

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
DOUTORADO EM AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

**INFERÊNCIAS AMBIENTAIS E TAXONÔMICAS COM BASE EM  
LENHOS CARBONIZADOS: ANÁLISE DE ALTERAÇÕES GERADAS  
PELA CARBONIZAÇÃO ARTIFICIAL DE ARAUCARIACEAE**

Isa Carla Osterkamp

Lajeado, junho de 2017.

Isa Carla Osterkamp

**INFERÊNCIAS AMBIENTAIS E TAXONÔMICAS COM BASE EM  
LENHOS CARBONIZADOS: ANÁLISE DE ALTERAÇÕES GERADAS  
PELA CARBONIZAÇÃO ARTIFICIAL DE ARAUCARIACEAE**

Tese apresentada ao Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do Título de Doutora em Ciências: Ambiente e Desenvolvimento, Linha de Pesquisa Ecologia.

Orientador: Prof. Dr. André Jasper

Coorientador: Prof. Dr. Dieter Uhl

Lajeado, junho de 2017.

Isa Carla Osterkamp

**INFERÊNCIAS AMBIENTAIS E TAXONÔMICAS COM BASE EM  
LENHOS CARBONIZADOS: ANÁLISE DE ALTERAÇÕES GERADAS  
PELA CARBONIZAÇÃO ARTIFICIAL DE ARAUCARIACEAE**

A Banca examinadora abaixo aprova a Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Doutora em Ciências: Ambiente e Desenvolvimento, na linha de pesquisa Ecologia.

Prof. Dr. André Jasper – orientador  
Centro Univeristário UNIVATES

Prof. Dr. Dieter Uhl - coorientador  
Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum

Prof. Dra. Etiene Fabbrin Pires  
Universidade Federal do Tocantins

Dra. Thaís Alves Pereira Gonçalves  
Museu Paraense Emílio Goeldi

Prof. Dr. Eduardo Périco  
Centro Univeristário UNIVATES

Lajeado, 30 de junho de 2017.

*Dedico esta tese a pessoa que me ensinou a amar, ser amada e  
fazer o bem sempre, meu pai, que nos deixou no início  
desta caminhada, mas sempre acreditou em mim dizendo: Minha Doutora!  
Para ti pai, onde estiver sei que estará orgulhoso!  
Te amo eternamente!*



## AGRADECIMENTOS

Nestes mais de 4 anos foram tantas as pessoas que estiveram ao meu lado, auxiliando, apoiando, cientificamente ou não, mas importantes de igual forma. Primeiramente tenho que agradecer ao meu orientador André Jasper, pois sem ele nada disso teria se concretizado. Tua confiança em mim estes anos todos, apostando no meu trabalho são de imensa gratidão, obrigada sempre por todas as oportunidades a mim proporcionadas, espero ter correspondido.

Ao meu coorientador alemão, Prof. Dr. Dieter Uhl, obrigada por toda a trajetória, pelo teu conhecimento, pela oportunidade de conhecer e vivenciar o Senckenberg Institut. Agradeço a Dra. Thaís Gonçalves, Dr. Eduardo Périco, Dra. Simone Stülp, Dra. Etienne Fabbrin Pires e Dra. Neli Galarce Machado pelos momentos de aprendizado, discussão e conhecimento, muito obrigada.

Minha família é merecedora de todo o agradecimento, toda a compreensão e auxílio nos momentos que mais precisei. Meu marido Rafael que sempre me apoiou e nunca se opôs a nada, obrigada por estar ao meu lado sempre e por lutar junto, com todos os nossos desafios diários. O que dizer da minha pequena Bia, minha filha amada que venceu todos os obstáculos deste trajeto, ficando muitas vezes sem a mãe ao lado, mas com muito amor sempre compreendeu a importância de cada ato. Meus irmãos Lis, Teo e Max, e cunhados Maurício e Mariana, sempre dando palavras de incentivo e me apoiando de alguma forma, muito obrigada, vocês são muito importantes na minha vida.

Minha mãe Marlise, obrigada pelo seu apoio incondicional, em meio a tantas perdas e desafios, soube ser mãe, vó e conselheira em muitos momentos, te agradeço imensamente por tudo, sempre ao meu lado, não tenho palavras para agradecer. Aos meus sogros Vera e Leco, agradeço cada vinda para cuidar de nós e da Bia, nos momentos que mais precisamos, muito obrigada, sem vocês muitas coisas não teriam dado certo!

As amigas foram imensas nesta trajetória, agradeço às colegas de doutorado e pesquisa, Marjorie e Mariela, que sempre estiverem presentes em muitos momentos, congressos, viagens, artigos, discussões e na vida familiar, sem vocês não teria tido sentido, obrigada. Laura, querida colega obrigada pela parceria de sempre. Todos os colegas do Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas e todos do Museu de Ciências Naturais, que sempre de alguma forma ou outra me auxiliaram, especialmente às queridas bolsistas Thaís Laux e Cibele Rockenbach, que sempre prontamente mostravam interesse e auxílio, obrigada.

As análises de microscópio eletrônico foram muitos intensas e duradouras, mas sem a prontidão e companheirismo da técnica Martha Horn, não teriam se realizado, obrigada pela amizade, conhecimentos e profissionalismo.

Agradeço a Capes/Fapergs pela bolsa concedida de Doutorado e a Capes pela bolsa de Doutorado Sanduíche.

Finalizando agradeço imensamente a uma pessoa que o Doutorado trouxe para a minha vida, Daniela Mueller de Lara, esta pessoa incrível e de uma pureza e coração imensos. Dani você esteve ao meu lado em momentos muito prazerosos e felizes, aprendi tanto contigo, sempre com palavras reflexivas e mensagens positivas, cada lágrima valeu a pena, obrigada por fazer parte da minha vida, agradeço muito a tua amizade e parceria.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*  
*(Arthur Schopenhauer)*

## RESUMO

Os vegetais são organismos sensíveis às mudanças climáticas e podem ser considerados importantes testemunhos de eventos ambientais que afetaram e continuam afetando o planeta. Quando inseridos em contexto sedimentar sob a forma de fósseis, as plantas acabam por se transformar em registros confiáveis de variações paleoambientais ocorridas enquanto viviam. Por sua vez, o carvão vegetal macroscópico é amplamente aceito como indicador de ocorrência de (paleo)incêndios vegetacionais durante o seu processo de deposição. O estudo do carvão vegetal tem permitido realizar interpretações paleoambientais, taxonômicas e tafonômicas, portanto muitos trabalhos já foram publicados sobre sua ocorrência em diferentes períodos geológicos em todo o planeta. Entretanto, os processos sobre a formação do carvão vegetal, as condições ambientais no momento de sua deposição, e principalmente as variações observadas nas suas estruturas anatômicas, tem sido alvo menos frequente de estudos. Estas alterações ainda são desconhecidas para muitos táxons modernos de relevância paleobotânica. O presente estudo analisa alterações anatômicas, durante a carbonização artificial de madeira em espécies de Araucariaceae (*Araucaria angustifolia*, *A. bidwillii*, *A. columnaris* e *Wollemia nobilis*). Os parâmetros vistos e a longa história geológica mostram o valor que as formas associadas à família Araucariaceae possuem na avaliação do clima e da geologia pretéritos, tornando seu estudo especialmente valioso para geólogos e paleobotânicos. Blocos de madeira foram submetidos ao tratamento térmico, da condição ambiente até 1000°C, aumentando de 50-50°C. O carvão foi analisado por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As mensurações dos caracteres anatômicos da madeira e do carvão foram analisadas estatisticamente em 0,05 de significância. Os resultados mostraram que a maioria das características anatômicas analisadas é estatisticamente significativas correlacionadas com as temperaturas de carbonização. Grande parte dos caracteres mostrou uma acentuada redução dimensional com o aumento da temperatura. No entanto, em comparação com a variabilidade das características anatômicas, há pouca modificação ocasionada pela temperatura. Com relação ao carvão vegetal fóssil de Araucariaceae, o presente trabalho pode contribuir para inferências taxonômicas e paleoambientais.

**Palavras-chave:** Araucariaceae, *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwillii*, *Araucaria columnaris*, *Wollemia nobilis*, anatomia, lenho, carvão vegetal,.

## ABSTRACT

Plants are organisms that are sensitive to climate change and can be considered important testimonies of environmental events that have affected and continue to affect the planet. When inserted in a sedimentary context in the form of fossils, the plants turn into reliable records of paleoenvironmental variations occurring while they lived. In turn, macroscopic charcoal is widely accepted as an indicator of occurrence of (paleo)wildfires during its deposition process. The study of charcoal has allowed to perform paleoenvironmental, taxonomic and taphonomic interpretations, so many works have already been published about their occurrence in different geological periods around the planet. However, the processes on charcoal formation, environmental conditions at the time of deposition, and especially the variations observed in their anatomical structures, have been less frequent targets of studies. These changes are still unknown to many modern taxa of paleobotanical relevance. The present study analyzes anatomical alterations during artificial carbonization of wood in Araucariaceae species (*Araucaria angustifolia*, *A. bidwillii*, *A. columnaris* and *Wollemia nobilis*). The parameters observed and the long geological history show the value that the forms associated to the Araucariaceae family have in the evaluation of the previous climate and geology, making their study especially valuable for geologists and paleobotanists. Wood blocks were submitted to the thermal treatment, from the ambient condition up to 1000°C, increasing from 50-50°C. The charcoal was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The measurements of the anatomical characters of the wood and the charcoal were statistically analyzed in 0,05 of significance. The results showed that most of the anatomical characteristics analyzed are statistically significant correlated with the carbonization temperatures. Most of the characters showed a marked dimensional reduction with increasing temperature. However, in comparison to the variability of anatomical characteristics, there is little modification caused by temperature. With regard to the fossil charcoal of Araucariaceae, the present work can contribute to taxonomic and paleoenvironmental inferences.

**Keywords:** Araucariaceae, *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwillii*, *Araucaria columnaris*, *Wollemia nobilis*, wood, charcoal, anatomy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – “Janela de fogo”, demonstrando a concentração, em porcentagem de O <sub>2</sub> livre na (paleo)atmosfera, necessário para que ocorra a combustão, e em destaque o limite inferior da janela do fogo, entre 12 e 15%. ....	23
Figura 02 – Esquema da carbonização da madeira, com temperaturas indicando a transformação química que ocorre em determinada faixa de temperatura.....	26
Figura 03 – Sedimento rochoso com a presença de carvão vegetal do registro fóssil (setas).....	28
Figura 04 – Sedimento rochoso com a presença de carvão vegetal do registro fóssil (setas).....	29
Figura 05 – Estruturas anatômicas em carvão vegetal preservadas e indicadas com seta.....	30
Figura 06 – Paleogeografia e o registro de coníferas relacionadas com Araucariaceae durante o Mesozoico. As formas com ramos distribuídos desde a base representam tipos primitivos da família, cujas afinidades com as formas modernas não puderam até o momento ser completamente estabelecidas. As linhas tracejadas correspondem aos limites da faixa de aridez. A –Triássico Superior; B – Jurássico Inferior e Médio; C – Cretáceo Inferior e Médio.....	32
Figura 07 - Região de ocorrência de <i>Wollemia nobilis</i> .....	36
Figura 08 – Distribuição geográfica e número de espécies dos gêneros modernos de Araucariaceae.....	37
Figura 09 – Distribuição de <i>Araucaria angustifolia</i> no Brasil.....	38
Figura 10 – Distribuição de <i>Araucaria araucana</i> no Chile e na Argentina.....	40
Figura 11 – Distribuição de componentes orgânicos nas paredes celulares de gimnosperma.....	44
Figura 12 – Camadas da parede celular de uma célula madura.....	45
Figura 13 –Esquema de diferenciadas pontoações, pontoação simples, pontoação areolada.....	45

Figura 14 – Formação do Tórus .....	46
Figura 15 – Esquema de passagem de fluídos pelas pontoações.....	47
Figura 16 – Campo de cruzamento, com intersecção de um traqueíde longitudinal e uma célula de parênquima radial.....	48
Figura 17 – Mapa de Localização dos municípios de coleta das amostras de Araucariaceae utilizadas neste estudo.....	53
Figura 18 – Exemplar de <i>Wollemia nobilis</i> localizado no <i>Palmengarden Frankfurt</i> de onde foi obtida a amostra para este estudo.....	54
Figura 19 – Localização de Frankfurt, local de coleta da amostra de <i>Wollemia nobilis</i> .....	55
Figura 20 – Representação das espécies de Araucariaceae coletadas (não sendo os exemplares suprimidos) e os lenhos de cada espécie suprimida utilizados neste trabalho.....	56
Figura 21 – Bloco de madeira com os três cortes e traqueídes, raios e pontoações.....	57
Figura 22 – Esquema da metodologia usada para carbonização artificial da madeira, utilizada em todas as espécies deste estudo.....	58
Figura 23 – Realização de medição de largura do traqueíde (linha amarela) em corte radial com a utilização do Software ImageJ.....	60
Figura 24 – Realização de medição da largura do lume (linha amarela) em corte transversal com a utilização do Software ImageJ.....	60
Figura 25 – Realização da medição da largura de um raio (linha amarela) em corte radial com a utilização do Software ImageJ.....	61
Figura 26 – Realização da medição da altura de um raio (linha amarela) em corte radial utilizando o Software ImageJ.....	61
Figura 27 – Realização da medição da largura de uma pontoação (linha amarela) no campo de cruzamento utilizando o Software ImageJ.....	62
Figura 28 – Realização da medição da largura de uma pontoação (linha amarela) em corte radial utilizando o Software ImageJ.....	62
Figura 29 – Realização da medição da largura de uma pontoação (linha amarela) em corte tangencial utilizando o Software ImageJ.....	63
Figura 30 – Exemplo de captura de 25 medidas de comprimento realizadas pelo software ImageJ.....	64
Figura 31 – Teste realizado para comprovar a retração do diâmetro antes e após queima, realizado com ramo de <i>Araucaria columnaris</i> , comparando a amostra <i>in natura</i> e carbonizada a 400°C.....	67

Figura 32 – Amostras de <i>Araucaria columnaris</i> em cada temperatura de queima, sendo possível observar as diferentes colorações, deste a amostra <i>in natura</i> até a cor negra, percebendo a diferença entre 250°C e 300°C, temperatura em que a madeira vira carvão vegetal.....	68
Figura 33 – Gráfico representando a perda de massa pós queima das amostras de <i>Araucaria angustifolia</i> , <i>Araucaria bidwillii</i> e <i>Araucaria columnaris</i> .....	69
Figura 34 – A – <i>Wollemia nobilis in natura</i> , em corte transversal, espaços intercelulares entre os traqueídes e parede celular não homogeneizada. B – <i>Wollemia nobilis</i> carbonizada à 400°C em corte transversal, observando-se a homogeneização das paredes celulares. C – <i>Wollemia nobilis in natura</i> em corte radial, mostrando os campos de cruzamento, com 2 a 4 pontoações em cada campo. D – Campo de cruzamento de <i>Wollemia nobilis</i> em corte radial, carbonizada à 400°C, mostrando a manutenção dos campos, com 2-4 pontoações por campo e paredes celulares homogeneizadas entre os traqueídes. E – Corte radial de amostra <i>in natura</i> , mostrando as pontoações areoladas uniseriadas nos traqueídes. F- <i>Wollemia nobilis</i> carbonizada a 400°C em corte tangencial com raios contendo de 1 a 4 células de altura.....	83
Figura 35 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	85
Figura 36 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do traqueídes de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	85
Figura 37 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no campo de cruzamento de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de CARVÃO VEGETAL carbonizados arti em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	86
Figura 38 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte tangencial de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de CARVÃO VEGETAL carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	86
Figura 39 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte radial de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha	

vermelha representa a tendência.....	87
Figura 40 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	87
Figura 41 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da largura dos raios de <i>Araucaria angustifolia</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	88
Figura 42 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	89
Figura 43 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro dos traqueídes de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	90
Figura 44 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	90
Figura 45 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte tangencial de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	91
Figura 46 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte radial de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	91
Figura 47 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	92
Figura 48 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da	



largura dos raios de <i>Araucaria bidwillii</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	92
Figura 49 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	94
Figura 50 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro dos traqueídes de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	94
Figura 51 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações nos campos de cruzamento de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	95
Figura 52 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no corte tangencial de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	95
Figura 53 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no corte radial de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	96
Figura 54 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	96
Figura 55 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da largura dos raios de <i>Araucaria columnaris</i> , na madeira <i>in natura</i> e em fragmentos de carvão vegetal carbonizados artificialmente em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.....	97

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise estatística linear regressiva bivariada, com %r <sup>2</sup> indicando a porcentagem dos dados do gráfico que são explicados pela temperatura ( <i>Wollemia nobilis</i> ).....	99
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expressão numérica dos dados das medições dos caracteres anatômicos obtidos neste estudo, comparados com a literatura existente. A – Média das 25 medições de Araucariaceae, B – Valores de Gregus, 1955, C – Valores de Steban et al., 2002.....	70
Tabela 2 – Expressão numérica das mensurações dos caracteres anatômicos do presente estudo <i>versus</i> a literatura existente. A – Média das 50 medições de <i>Wollemia nobilis</i> B– Valores de Heady et al, 2002. ....	70
Tabela 03 – Imagens de MEV de <i>Araucaria angustifolia</i> nos três cortes da madeira em temperaturas de 50°C a 900°C.....	71
Tabela 04 – Imagens de MEV de <i>Araucaria bidwillii</i> nos três cortes da madeira em temperaturas de 50°C a 800°C.....	75
Tabela 05 – Imagens de MEV de <i>Araucaria columnaris</i> nos três cortes da madeira em temperaturas de 50°C a 800°C.....	79
Tabela 06 – Análise da Regressão Linear Bivariate de <i>Araucaria angustifolia</i> em 7 caracteres anatômicos medidos em diferentes temperaturas, com valores de r, p, r <sup>2</sup> e %r <sup>2</sup> .....	84
Tabela 07 – Análise da Regressão Linear Bivariate de <i>Araucaria bidwillii</i> em 7 caracteres anatômicos medidos em diferentes temperaturas, com valores de r, p, r <sup>2</sup> e %r <sup>2</sup> .....	89
Tabela 08 – Análise da Regressão Linear Bivariate de <i>Araucaria columnaris</i> em 7 caracteres anatômicos medidos em diferentes temperaturas, com valores de r, p, r <sup>2</sup> e %r <sup>2</sup> .....	93
Tabela 09 – Valores de p, r e r <sup>2</sup> das características anatômicas medidas.....	97

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IAWA	International Association of Wood Anatomists
LabPbEvBio	Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas
MCN	Museu de Ciências Naturais
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO.....</b>	<b>22</b>
2.1 Incêndios Vegetacionais.....	22
2.2 Processo de Carbonização de Material Vegetal.....	25
2.3 Características do Carvão vegetal Macroscópico.....	27
2.4 Família Araucariaceae.....	30
2.5 Anatomia das Gimnospermas.....	42
2.5.1 Descrição Anatômica de <i>Araucaria angustifolia</i> .....	48
2.5.2 Descrição Anatômica de <i>Araucaria bidwillii</i> .....	49
2.5.3 Descrição Anatômica de <i>Araucaria columnaris</i> .....	49
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
3.1 Procedimentos de Coleta do Material Utilizado.....	52
3.2 Fase de Processamento do Material em Laboratório.....	56
3.3 Captura das Imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Medição dos Caracteres Anatômicos.....	59
3.4 Métodos Estatísticos Aplicados.....	64
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
4.1 Tamanho e forma.....	67
4.2 Cor.....	68
4.3 Perda de massa.....	68
4.4 Comparação Anatômica.....	70
4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	71
4.6 Análise Estatística.....	84
4.6.1 Teste aplicado em <i>Araucaria angustifolia</i> , <i>Araucaria bodwillii</i> e <i>Araucaria columnaris</i> .....	84
4.6.2 Teste aplicado em <i>Wollemia nobilis</i> .....	98
4.7 Discussão.....	100
4.8 Conclusões.....	104
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>106</b>

# 1

## INTRODUÇÃO

---

*Inferências ambientais e taxonômicas com base em lenhos carbonizados:  
análise de alterações geradas pela carbonização artificial de Araucariaceae*



## 1 INTRODUÇÃO

Para que seja possível estabelecer modelos da evolução dos ambientes terrestres atuais, é necessário compreender os processos pelos quais o planeta passou durante o tempo, na tentativa de entender as causas e consequências dos numerosos eventos de mudanças ocorridos ao longo do tempo geológico (SOROKHTIN et al., 2007). Nesse contexto, os resultados das reconstruções paleoambientais podem ser aplicados à realidade atual, confirmando que elas são ferramentas importantes para estudos acerca das questões ambientais contemporâneas (GASTALDO et al., 1996). Desta forma, estes estudos podem definir e orientar ações de preservação e recuperação dos sistemas atuais, sendo importante fazer uma análise dos biomas terrestres como um todo, focando os processos envolvidos na sua formação, manutenção e estabilidade (SCOTT, 2000; UHL et al., 2004; JASPER et al., 2007).

As plantas são marcadores ecológicos bastante confiáveis e seus remanescentes fósseis representam excelentes *proxies* para reconstruir e compreender as mudanças ambientais através do tempo (BEERLING, 2007). Suas características anatômicas e morfológicas podem ser usadas, entre outras, para reconstruir as variações climáticas locais e globais (GASTALDO, DIMICHELE, PFEFFERKORN, 1996; CHALONER, McELWAIN, 1997). O carvão vegetal fóssil é uma forma de preservar restos de plantas ao longo de amplas escalas de tempo, resultado da combustão incompleta da vegetação sujeita a eventos de (paleo)incêndio e resistente à maioria das formas de degradação químicas ou biológicas (SCOTT, 2000, 2010).

Desta forma, o carvão vegetal é um indicativo direto da ocorrência de (paleo)incêndios vegetacionais (e.g. SANDER, 1987; SCOTT, 1990; SANDER; GEE, 1990; JONES;

CHALONER, 1991; SCOTT, JONES, 1994; FALCON-LANG, 2000; GLASSPOOL, 2000; WANG; CHEN, 2001; UHL; KERP, 2003; DiMICHELE et al., 2004; UHL et al., 2004, 2007; JASPER et al., 2008, 2011a, 2011b; MAHESH et al., 2015; SHEN et al., 2011; SLATER et al., 2015; TEWARI et al., 2015) os quais são considerados um dos principais modeladores dos ambientes atuais e pretéritos (SCOTT, 2000). Tendo em vista que esses eventos independem da ação humana, eles também figuram como um agente fundamental para a evolução dos biomas ao longo do tempo (SCOTT; STEA, 2002; PRESTON; SCHMIDT, 2006, GUTSELL; JOHNSON, 2007; ZEDLER, 2007), tanto que, conforme Bond e Keeley (2005), o fogo pode ser comparado à herbivoria como fator de modificação dos diferentes biomas durante o tempo geológico.

A ocorrência de (paleo)incêndios vegetacionais é recorrente desde a invasão dos continentes por plantas embriofíticas durante o Siluriano ( $\pm$  445 e 420 m.a. atrás) e, devido à sua dependência direta de diferentes parâmetros ambientais, permite inferências paleoecológicas (GLASSPOOL et al., 2004). O fogo é uma importante fonte de modificações em muitos ecossistemas ainda na atualidade (BOWMAN et al., 2009).

Lenhos carbonizados já foram a mais tempo estudados para identificação de espécies (HEER, 1865, PREJAWA, 1896, BREUIL, 1903), entretanto o método utilizado no passado, confecção e análise de lâminas finas de material carbonizado, era muito lento e de difícil obtenção. Somente com o uso de microscopia de luz refletida, na década de 1960 (WESTERN, 1963; VERNET, 1973), que foi possível realizar análises antracológicas e também voltou-se a abordagem paleoecológica ao estudo dos carvões. A partir da década de 70 que a antracologia se desenvolveu, mais precisamente, na França, e no final da década de 90 que foi trazida para o Brasil (SCHEEL et al., 1996b; SCHEEL-YBERT, 1998).

O que pode ser observado, tanto em carvão vegetal atual quanto no do registro fóssil, é que a carbonização gera modificações tanto na composição química (e.g. DE LARA et al., 2017) quanto na estrutura dos tecidos vegetais preservados (e.g. JONES; CHALONER, 1991). No caso dos lenhos, podem ser observadas, por exemplo, a homogeneização das paredes celulares e a ampliação da dimensão dos raios (e.g. PRIOR; ALVIN, 1983; SCOTT; JONES, 1991, PRIOR; GASSON, 1993; SCOTT, 2000; SCOTT, 2010).

Por outro lado, as características qualitativas da madeira permanecem, na maioria, inalteradas, sendo que os caracteres quantitativos (e.g. diâmetro das células, espessura da parede celular, diâmetro dos traqueídes, pontoações no campo de cruzamento) e qualitativos vêm sendo utilizados para apoiar inferências taxonômicas e paleoecológicas (e.g. PRIOR; GASSON, 1993). Todavia, estudos comparativos entre registros fósseis e madeiras atuais carbonizadas ainda são restritos, limitando a compreensão dos reais efeitos da ação do fogo sobre o material encontrado.

O desafio abordado no presente trabalho são os potenciais efeitos de diferentes tratamentos térmicos sobre a estrutura de lenhos de gimnospermas e os seus reflexos na construção de inferências (paleo)ambientais. Para tanto são avaliadas de forma quantitativa e qualitativa as alterações que ocorrem em fragmentos de lenhos de Araucariaceae durante a carbonização artificial em diferentes temperaturas e seus reflexos sobre características taxonômicas significativas.

Assim, para o desenvolvimento do presente estudo, foram propostos os seguintes objetivos:

#### Geral:

Realizar análise comparada da anatomia de madeiras atuais carbonizadas, verificando as alterações estruturais geradas pela carbonização em diferentes temperaturas com vistas a dar suporte à inferência de processos envolvidos na formação de carvão vegetal do registro fóssil.

#### Específicos:

1. Definir a influência de diferentes temperaturas de carbonização sobre as potenciais alterações anatômicas geradas pela carbonização de lenhos atuais.
2. Avaliar a confiabilidade das análises anatômicas do carvão vegetal para o estabelecimento de correlações taxonômicas para o material encontrado no registro fóssil.
3. Discutir a eficiência da inferência de condições (paleo)ambientais baseadas em registros de carvão vegetal em registros fósseis.

Para que os objetivos elencados fossem atingidos, este documento foi dividido em três partes. No **Tema e Problematização** é apresentada uma revisão teórica acerca das questões



abordadas nesta tese, ou seja, os Incêndios Vegetacionais, o Processo de Carbonização de Material Vegetal, as Características do Carvão Vegetal, a Família Araucariaceae e a Anatomia do Lenho das Gimnospermas. Essa contextualização teve como finalidade propor a justificativa para o desenvolvimento do estudo.

Já nos **Materiais e Métodos**, são descritos os Procedimentos de Coleta do Material Utilizado, a Fase de Processamento do Material em Laboratório, a Captura das Imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e os Métodos Estatísticos Aplicados. Nos **Resultados**, apresenta-se os dados coletados a partir da aplicação das metodologias utilizadas, sendo que eles são comparados de forma crítica com publicações prévias em **Discussão**. Por fim, em **Considerações Finais e Conclusões**, são propostas os desfechos construídos com base na integração dos elementos estabelecidos anteriormente.

# 2

## TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO

---

*Inferências ambientais e taxonômicas com base em lenhos carbonizados:  
análise de alterações geradas pela carbonização artificial de Araucariaceae*



## **2 TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO**

### **2.1 Incêndios Vegetacionais**

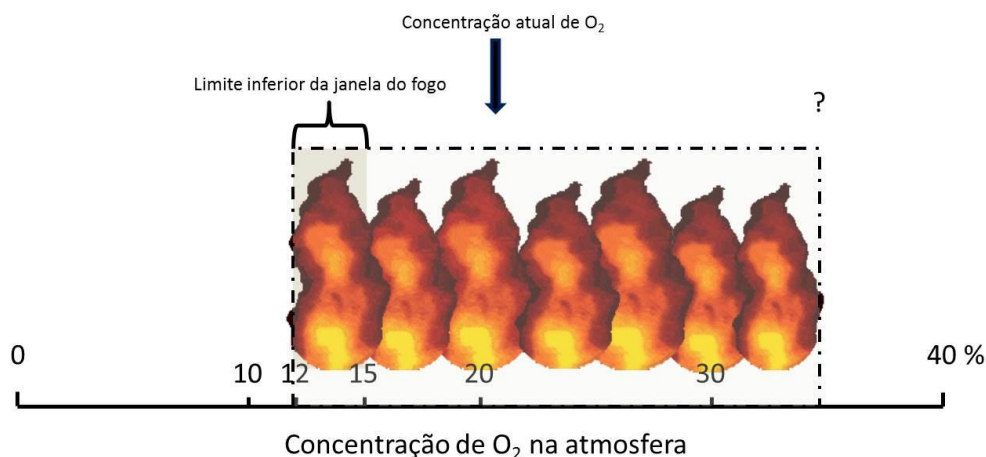
O fogo é um agente onipresente nas alterações nos ecossistemas terrestres (SCOTT; STEA, 2002; PRESTON; SCHMIDT, 2006; SCOTT, 2010; SCOTT; DAMBLON, 2010) e tem importantes impactos sobre os processos ecológicos, atmosféricos e químicos. Além disso, sua manifestação tem relação com o ciclo do carbono global, podendo ser considerado um elemento cujo estudo serve de entendimento das dinâmicas ambientais da Terra (PRESTON; SCHMIDT, 2006). Neste sentido, a ocorrência de paleoincêndios se destaca nas análises paleobotânicas como um dos eventos mais comuns ocorridos ao longo do tempo profundo (JASPER et al., 2011a).

Segundo Scott (2000) e Preston e Schmitt (2006), o fogo age como um fenômeno comum na modelagem de ambientes atuais e pretéritos. A ignição do fogo sobre a vegetação está diretamente relacionada aos níveis de oxigênio atmosférico (WATSON; LOVELOCK; MARGULIS, 1978). Assim, a ocorrência de carvão vegetal é controlada pelas mudanças climáticas e ambientais, mesmo em longas escalas de tempo (FLANNIGAN et al., 2009).

Analisando-se a frequência dos paleoincêndios no passado, deve-se levar em consideração a ação de três elementos básicos, necessários para que haja a combustão dos materiais: 1) concentração de oxigênio atmosférico; 2) disponibilidade de material combustível; 3) ocorrência de fontes de ignição. Esses fatores formam o que alguns autores (e.g GUTSELL; JOHNSON, 2007) definem como triângulo do fogo. Segundo Scott (2010), a avaliação da ocorrência de (paleo)incêndios, permite a análise integrada destes três elementos, viabilizando a construção de mosaicos (paleo)ambientais consistentes.

Para que a combustão ocorra é necessário que os níveis de  $O_2$  sejam superiores ao limite inferior da “janela de fogo” (Figura 01), ou seja, acima de 12-15% (CLARK; RUSSELL, 1981; COPE; CHALONER, 1981). Considerando que os níveis de  $O_2$  atmosférico dependem de um conjunto de variáveis baseadas no equilíbrio ambiental global e regional, o simples registro de paleoincêndios é um indicativo importante de condições paleoambientais, como, concentração de  $O_2$ , umidade e disponibilidade de combustível (WILLIS; MACELWAIN, 2002; SCOTT, 2010).

Figura 01 – “Janela de fogo”, demonstrando a concentração, em porcentagem de  $O_2$  livre na (paleo)atmosfera, necessário para que ocorra a combustão, e em destaque o limite inferior da janela do fogo, entre 12 e 15%.



Fonte: Baseado em Scott, 2000.

Os regimes de fogo podem ser influenciados por alguns fatores para que o incêndio ocorra. O combustível disponível, ou seja, a vegetação deve estar seca o suficiente para que possa ser submetida à ignição e iniciar o processo de combustão. Condições ambientais adequadas também são necessárias para permitir que o fogo se propague rapidamente, e.g. altas temperaturas, alta velocidade do vento e baixa umidade. E a ignição, de forma que possibilite o início de um incêndio (BRADSTOCK, 2010).

A combustão dos vegetais, transformados em carvão vegetal, preserva os fragmentos das plantas em detalhes minuciosos, podendo fornecer dados sistemáticos e funcionais sobre organismos já extintos, o que possibilita a reconstrução dos ecossistemas passados e a sua correlação com os ambientes atuais (SCOTT, 2000).

Apesar da estrutura anatômica da madeira manter-se conservada após transformação em carvão vegetal, podem ocorrer variações morfométricas durante o processo de carbonização, que dificultam a distinção de espécies próximas (MARGUERIE; HUNOT, 2007). Portanto, a compreensão das características dos carvões vegetais atuais, cuja afinidade taxonômica seja conhecida, torna-se ferramenta importante para a definição de características dos lenhos após carbonização, permitindo a identificação de possíveis alterações anatômicas (PRIOR; GASSON, 1993).

Diversos trabalhos com abordagem tecnológica avaliaram as modificações estruturais do carvão vegetal, obtido a diferentes temperaturas (KOLLMANN; SACHS, 1967; MCGINNES et al., 1971; BEALL et al., 1974; SLOCUM et al., 1978; KIM; HANNA, 2006; KWON et al., 2009). Também foram desenvolvidos estudos com enfoque anatômico, arqueológico, e paleoambiental (e.g., PRIOR; ALVIN, 1983; PRIOR; GASSON, 1993; BRAADBART; POOLE, 2008; GONÇALVES, 2010; GONÇALVES et al., 2012).

Os incêndios necessitam de oxigênio para propagarem e, portanto o carvão vegetal é formado em sistemas com a presença de oxigênio (BEAUMONT, 1985). A grande parte dos incêndios naturais começa por fontes de ignição disponíveis no meio (e.g. relâmpagos, polarização de luz), sendo que a planta é submetida em um curto espaço de tempo a altas temperaturas que causam a separação da celulose no tecido da planta (PYNE et al., 1996).

Todavia, quando associado a fragmentos de lenho, a carbonização interna se dá de forma um pouco diferenciada: o calor do fogo penetra nos tecidos da planta e ocorre uma reação de pirólise. O calor quebra as moléculas resultando em gases voláteis, que quando entram em contato com o oxigênio geram a combustão. Se essa reação cessa antes de completar a combustão, o carvão vegetal é deixado como um resíduo (SCOTT, 2010).

Autores como Belcher e McElwain (2008) e Belcher et al. (2010) afirmam que os níveis de oxigênio devem ser considerados fatores muito importantes no estudo de paleoincêndios, sendo eles a causa de sua propagação. Scott (2000), afirma que os registros de carvão vegetal também sofreram influência das variações de concentração dos níveis de oxigênio atmosférico. Confirmando tal teoria, Glasspool e Scott (2010) estabelecem que as variações das concentrações de oxigênio na atmosfera têm sido, ao longo do tempo, responsáveis diretas pela frequência dos paleoincêndios.

## 2.2 Processo de Carbonização de Material Vegetal

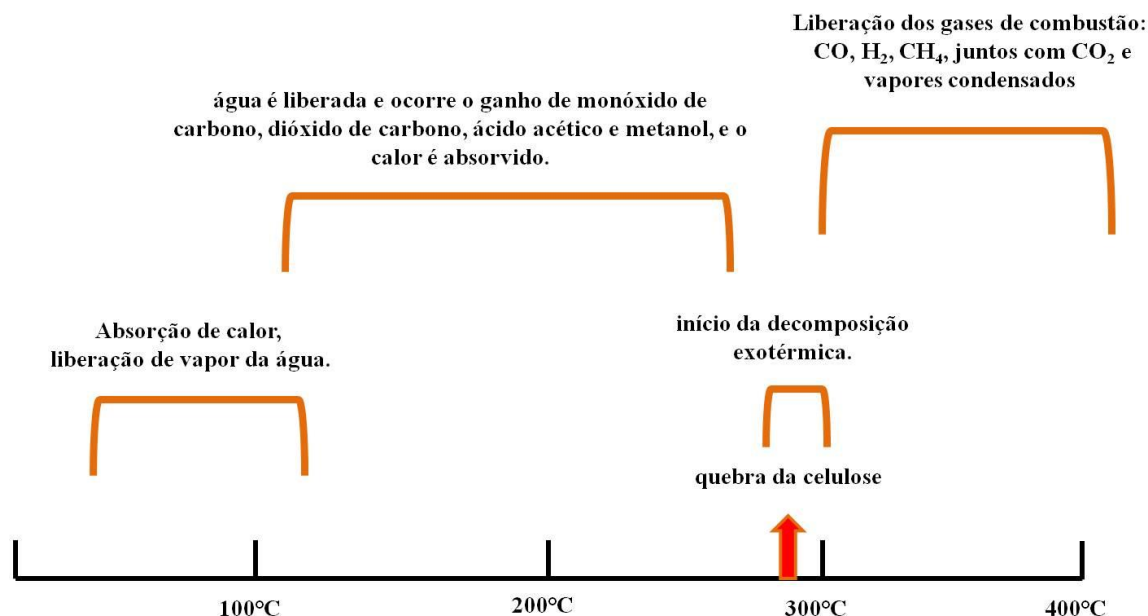
Para que ocorra a carbonização do vegetal, o processo passa por fases que dependem da temperatura alcançada. Na madeira, a quebra da celulose começa aos 290°C. De 20°C à 110°C a madeira absorve calor, na medida em que vai liberando o vapor da água. Com temperatura superior a 100°C a madeira ainda está secando. De 100°C à 270°C, os últimos traços de água são liberados e a madeira começa a aumentar os níveis de monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido acético e metanol, e o calor é absorvido. De 270°C à 290°C, é o ponto de início da decomposição exotérmica. De 290°C à 400°C as quebras das estruturas da madeira continuam (Figura 02), os vapores liberados compreendem os gases de combustão CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, juntos com CO<sub>2</sub> e vapores condensados: água, ácido acético, metanol, acetona, etc., e se tornam predominantes nas temperaturas mais elevadas, conforme descreveu Beaumont (1985).

Os tecidos de plantas seguem um padrão similar de formação de carvão vegetal, pois apesar da alteração na parede celular, a anatomia das plantas ainda é preservada, no entanto, os vegetais perdem massa neste processo. O carbono presente no tecido da planta aumenta e o carbono dominante dentro da parede celular se torna ordenado (ASCOUGH et al., 2010).

Aos 400°C a transformação do lenho em carvão vegetal é praticamente completa (De Lara et al, 2017), nessa temperatura ainda contém quantidades apreciáveis de líquidos destilados, podendo ser 30% da massa presa na estrutura. Este carvão vegetal precisa aquecer a temperaturas mais altas para liberar líquidos destilados e elevar o carbono fixado para 75%, quantidade normal para o carvão comercial. Para liberar todos esses líquidos o carvão vegetal é submetido a temperaturas elevadas até 500°C, isso completa o estágio de carbonização (BEAUMONT, 1985; SCOTT, 2010).

O processo de produção de carvão vegetal consiste na concentração do carbono do lenho, liberando os demais elementos químicos da sua composição pela ação da energia térmica (THIBAU, 2000). Brito (1990), Andrade (1993) e Andrade e Carvalho (1998) salientam que, durante a conversão do lenho a carvão vegetal, ocorre a concentração de carbono e, da mesma forma, fenômenos físico-químicos que resultam no resíduo sólido carbonoso (carvão) e em uma fração gasosa.

Figura 02 – Esquema da carbonização de lenho, com temperaturas indicando a transformação química que ocorre em determinada faixa de temperatura.



Fonte: Baseado em Beaumont, 1985

O carvão vegetal, é o resíduo sólido da carbonização do lenho, quando queimada ou aquecida em atmosfera restrita de oxigênio, em que à medida que aumenta a temperatura, ocorre a liberação da água, dos compostos voláteis, uma fração de compostos orgânicos condensáveis à temperatura ambiente, etc., sem a ocorrência de combustão total pela pouca quantidade de O<sub>2</sub> (ALMEIDA; REZENDE, 1982).

A carbonização é um processo em que o lenho é submetido a tratamento térmico sob temperatura elevada em atmosfera redutora controlada (ALMEIDA; REZENDE, 1982). A formação do carvão vegetal pode ocorrer com o aquecimento do lenho: (1) em presença de oxigênio quando ocorre o processo de queima, com a liberação das substâncias voláteis que se inflamam, produzindo chamas; o processo de combustão pode se completar até a formação de cinzas, ou se apresentar de maneira incompleta com a produção de carvão vegetal; (2) em ausência de oxigênio, com a liberação das substâncias voláteis pelo aquecimento, sem a formação de chamas e o processo de carbonização resultando na formação do carvão vegetal (BRAADBART; POOLE, 2008).

O lenho quando submetido à carbonização sofre alterações como: (1) coloração, com escurecimento que, ao final do processo, se torna negro; (2) propriedades físicas, com significativa perda de massa, contração, distorções anatômicas e perda de substâncias voláteis

e (3) propriedades químicas, como a conversão contínua e gradual da celulose, hemicelulose e lignina, formando um produto rico em carbono e quimicamente distinto (SHAFIZADEH, 1982; BOON et al., 1994; BRAADBART; POOLE 2008; GONÇALVES, 2010).

A perda da água e de substâncias voláteis do lenho na carbonização provoca sua contração volumétrica, com variações morfométricas pela reorganização da parede celular das células. A estrutura anatômica, % (percentual) de umidade inicial, tempo de exposição, temperatura de carbonização, presença de compostos inorgânicos, etc., influenciam no comportamento do lenho. Quanto mais seco o lenho a ser carbonizada, menor será a alteração dos tecidos provocada pela expansão da água e do vapor durante o processo de carbonização (McGINNES et al., 1971; SLOCUM et al., 1978; PRIOR; ALVIN, 1986; JONES; CHALONER, 1991; PRIOR; GASSON, 1993).

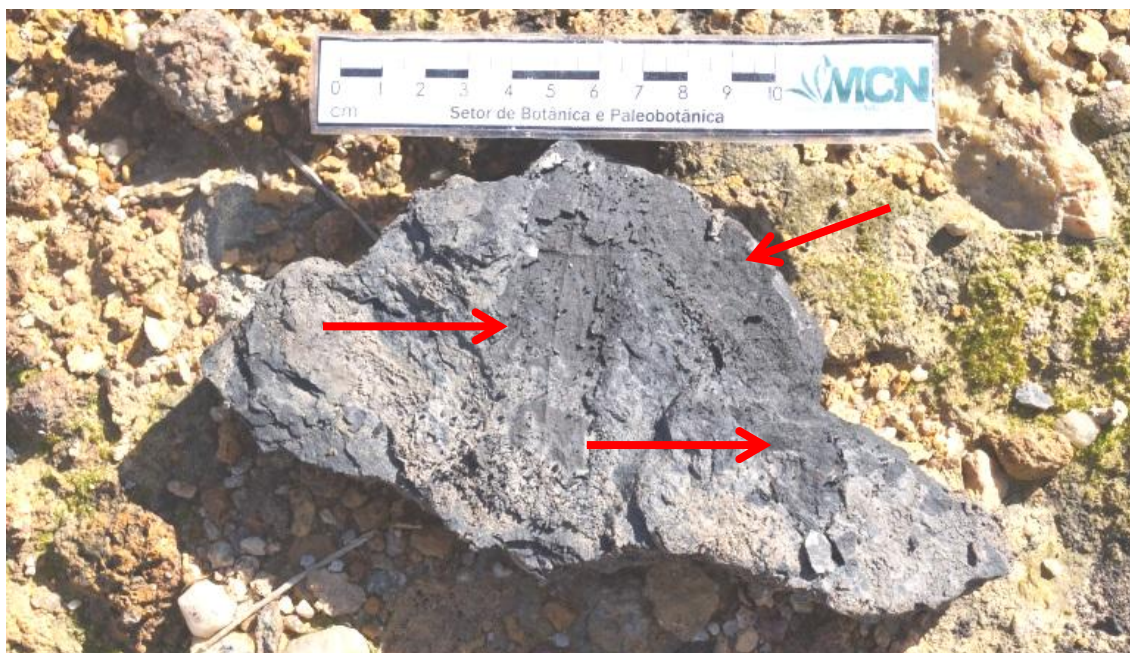
### **2.3 Características do carvão vegetal**

Os estudos sobre a ocorrência dos paleoincêndios são abundantes para muitos períodos e áreas, podendo, todavia, ser raros em outros (SCOTT, 2000; SCOTT, 2010). Para Jasper et al. (2011b), o Paleozoico Superior é um exemplo dessa discrepância, considerando que, enquanto no Hemisfério Norte trabalhos como os de Scott (1990); Scott e Jones (1994); Falcon-Lang (2000); Uhl e Kerp (2003); Uhl et al. (2004, 2008); Sander (1987); Sander e Gee (1990); DiMichele et al. (2004); Wang e Chen (2001) relatam detalhadamente a anatomia de carvão vegetal, significado paleoambiental e frequência, para o Hemisfério Sul as publicações ainda são restritas e recentes.

A presença de carvão vegetal do registro fóssil (Figura 03) é abundante em muitas sequências sedimentares, sua presença é geralmente negligenciada por pesquisadores, por ser uma falha o seu reconhecimento no campo. Quando o vegetal é queimado sofre diagênese ou carbonificação, com o soterramento e aumento da temperatura os tecidos da planta compactam e carbonificam, nesse processo ocorrem mudanças na composição química do material orgânico e na sua cor (Scott, 2003).



Figura 03 – Sedimento rochoso com a presença de carvão vegetal do registro fóssil (setas).



Fonte: LabPbEvBio/MCN/Univates

Alguns estudos sobre incêndios tem demonstrado que existe movimento do carvão vegetal microscópico (menor que 2mm) transportado pelo vento, onde partículas menores são sopradas para fora da área do incêndio. Nesses casos é considerado que o carvão vegetal microscópico possa refletir dados de fogo regional, em contraste tem sido assumido que a ocorrência de carvão vegetal relata incêndios locais. A maior parte do carvão é transportada pela água e pode ser depositado em uma distância considerável, afastada do local de queima, em vez de se tornar incorporada no sedimento (MASIELLO; DRUFFEL, 1998; FORBES et al., 2006).

A ocorrência de (paleo)incêndios vegetacionais é detectada por diferentes formas. A mais conhecida é a de carvão vegetal fóssil, os quais são indicadores diretos desse tipo de evento nos horizontes sedimentares. Podem ser detectados em campo, pelo fato de que apresentam características distintivas macroscópicas facilmente identificadas a olho nu, como coloração negra e brilho sedoso (Figura 04). Além disso, o estudo de seus detalhes microscópicos [paredes celulares homogeneizadas e características anatômicas preservadas (Figura 05)] é relativamente simples de ser detectado sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (JASPER et al., 2011b).

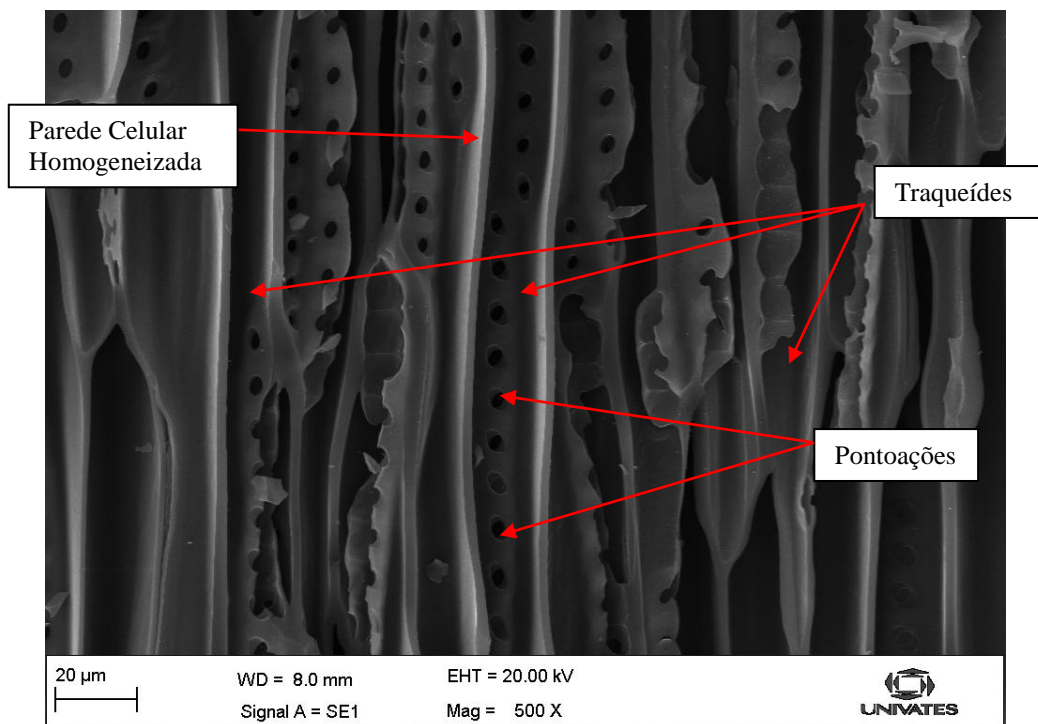
Figura 04 – Sedimento rochoso com a presença de carvão vegetal do registro fóssil (setas).



Fonte: LabPbEvBio/ MCN/ UNIVATES.

A presença de carvão vegetal fóssil indica a ocorrência de incêndios vegetacionais e a sua análise serve de base para as inferências paleoambientais em diferentes ecossistemas, que vão desde a caracterização da vegetação que foi queimada (JASPER et al., 2011a, 2011b), passam pelos elementos de ignição dos incêndios, sua temperatura aproximada, seu impacto sobre o ambiente local, e culminam com a análise da composição atmosférica durante o evento (SCOTT; DAMBLON, 2010). Reforçam a hipótese de que incêndios vegetacionais já ocorriam desde o advento das primeiras plantas terrícolas (GLASSPOOL et al., 2004).

Figura 05 – Estruturas anatômicas em carvão vegetal preservadas e indicadas com seta.



Fonte: Da Autora.

## 2.4 Família Araucariaceae

A família Araucariaceae tem fascinado botânicos e palaeobotânicos por muito tempo, pois apresenta uma arquitetura incomum e é classificada como “fóssil vivo” entre as coníferas. As Araucariaceae apresentam atualmente três gêneros: *Agathis*, *Araucaria* e *Wollemia*, com 41 espécies e uma variedade que representa apenas uma parcela do que foi o grupo no passado geológico (FARJON, 2001).

Para a realização deste trabalho foram escolhidas espécies da família Araucariaceae por serem gimnospermas atuais que constituem o melhor exemplo para a análise de floras mais antigas. As espécies de *Araucaria* são um modelo vivo para o gênero de lenho fóssil *Agathoxylon* Hartig, que é anatomicamente semelhante à lenhos de Araucariaceae moderna. O táxon tem um longo registro estratigráfico, a partir do Carbonífero (RENNER, 2009), e é distribuído globalmente (DUTRA; STRANZ, 2003).

As gimnospermas compartilham atributos ecofisiológicos que as distinguem das plantas com flores de outros grupos (KERSHAW; McGLONE 1995). Suas folhas são pequenas e endurecidas e os caules menos eficientes no transporte dos fluidos e soluções, já que possuem predominantemente traqueídes, limitam e retardam seu crescimento e o desenvolvimento das sementes e plântulas. As folhas são também menos vascularizadas e limitadas quanto às possibilidades de variar em forma e tamanho, o que pode ser a causa de sua menor tolerância aos locais sombreados. A menor eficiência fisiológica é, contudo, compensada pelo caráter perene e longo dos indivíduos, garantindo o tamanho e porte expressivo e uma maior resistência às condições adversas (DUTRA; STRANZ, 2003).

A família Araucariaceae pertence ao grupo das coníferas e esteve globalmente espalhada durante o Paleozoico, sendo neste período o seu ápice de diversidade e abundância ecológica (HARRIS; 1979; CARPENTER; POLE 1995). Os registros mais antigos desta família são relacionados ao Paleozoico Superior/Mezozoico Inferior. Distribuídas no hemisfério sul, ocupam uma área que antes era o Gondwana. O ancestral comum mais recente de *Agathis* e *Wollemia* data de 110 m.a., deduzidos a partir de fósseis de *Agathis* e *Wollemia* com idade do Aptiano (Cretáceo Superior) (KUNZMANN, 2007a,b).

Somente no Jurássico que ocorreu o clímax da família, sendo que a partir do Cretáceo inicia-se o declínio de sua presença, acompanhado da crescente restrição geográfica (KUNZMANN, 2007b). A inferência de que a Patagônia teria sido o centro de distribuição do gênero *Araucaria* foi estabelecida por Del Fueyo e Archangelsky (2002) e é baseada no fato de que três das quatro linhagens presentes nas floras atuais têm seu registro nessa região no Mesozoico. Foi neste período que a família Araucariaceae esteve mais diversificada e ecologicamente abundante e constituem um componente bem preservado de muitos fósseis (HARRIS, 1979; CARPENTER; POLE 1995).

Estudos paleobotânicos têm atribuído a Araucariaceae a condição de "basal" entre as famílias de coníferas existentes. No Mesozóico, tem demonstrado uma distribuição padrão em dois hemisférios, com registros no Gondwana e na Laurásia. Evidências fósseis sugerem que a família tem diminuído gradualmente em número de espécies e distribuição geográfica a partir do Cretáceo-Paleogeno (TAYLOR; TAYLOR, 1993).

O registro fóssil apresenta cones de sementes e troncos petrificados de *Araucaria* spp, que estão entre os mais bem preservados e mais atraentes fósseis de vegetais. A fossilização

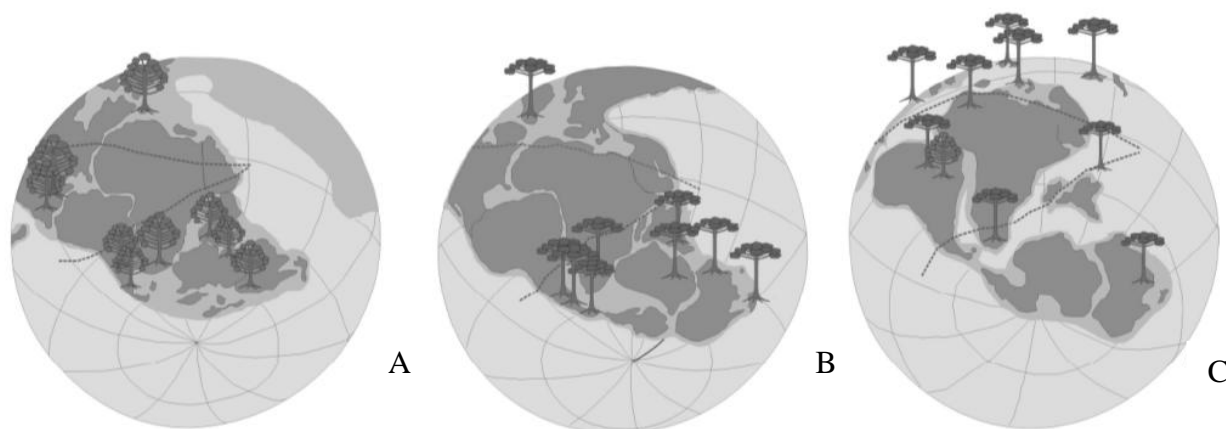
geralmente necessita de condições especiais, e os remanescentes fósseis foram reconhecidos, até agora, geralmente poucas vezes nos sedimentos (KERSHAW; WAGSTAFF, 2001).

Em grande parte dos fósseis de Araucariaceae preservam-se apenas as feições do lenho, razão pelas quais, quando “caracteres araucarióides” estão presentes, são atribuídos apenas a morfôgêneros, tais como *Dadoxylon* Endlicher e *Araucarioxylon* Kraus (incluídos em *Agathoxylon* por BAMFORD; PHILIPPE, 2001).

Do ponto de vista anatômico, a maioria das espécies tradicionalmente atribuídas a *Agathoxylon* estão dentro da variabilidade de lenhos de uma ou duas espécies modernas de Araucariaceae (SEWARD; FORD, 1906; GREGUSS, 1955; GONDRAN et al., 1997; DUTRA; STRANZ, 2003).

O exame do registro fóssil das gimnospermas atuais, entre elas as Araucariaceae, sugere que as condições propícias para seu aparecimento foram criadas após a grande extinção do final do Permo-Triássico. Para Veblen et al, 1995, a união dos continentes formando o Pangea propiciou o aparecimento de grandes cinturões de aridez, cercados por estreitas, mas importantes, áreas subtropicais, onde alguma condição de umidade existia, especialmente na borda dos continentes.

Figura 06 - Paleogeografia e o registro de Araucariaceae durante o Mesozoico. As formas com ramos distribuídos desde a base representam tipos primitivos da família, cujas afinidades com as formas modernas não puderam até o momento ser completamente estabelecidas. As linhas tracejadas correspondem aos limites da faixa de aridez. A – Triássico Superior; B – Jurássico Inferior e Médio; C – Cretáceo Inferior e Médio.



FONTE: Alterado de Dutra e Stranz, 2003.

Entre os gêneros modernos, *Araucaria* reúne o registro mais antigo, apesar das propostas filogenéticas apontarem *Wollemia* como precedendo a diferenciação entre *Agathis* e *Araucaria*. O registro de *Araucaria* apenas em níveis posteriores ao Cretáceo e sua restrita distribuição moderna não parecem apoiar essa hipótese. Tipos com características das secções *Eutacta* e *Bunya* do gênero *Araucaria* estão entre os mais antigos fósseis (MEYEN, 1987).

Assim, a presença de dois cotilédones representaria o caráter ancestral, seguido de formas com quatro cotilédones. Já a posição terminal ou axial do cone masculino esteve presente, muitas vezes e de forma alternada, entre os fósseis da família (DUTRA; STRANZ, 2003).

Após sua origem no início do Jurássico, *Eutacta* se distribui amplamente e em ambos os hemisférios, enquanto *Bunya*, abundante no Mesozóico e com um fraco registro no Terciário, se restringirá a uma única espécie moderna (*Araucaria bidwilli*) (KUNZMANN, 2007b).

Essa distribuição sugere a ausência de relações entre o estoque primitivo dessa secção e a forma viva atual. As outras duas secções, *Columbea* e *Intermedia*, também irão se expandir durante o Mesozóico, especialmente no lado americano do Gondwana. O gênero *Agathis*, cujo mais antigo registro conhecido data somente do final do Cretáceo, mostra também uma menor variação genética e morfológica, sugerindo que os processos de especiação nesse grupo sejam recentes e nas áreas do sudeste do Pacífico (DUTRA; STRANZ, 2003).

A primeira fase de diversificação e especiação é interrompida no início do Cretáceo, quando começa a fragmentação do Gondwana e as angiospermas aparecem como invasoras oportunistas dos ambientes costeiros e terras baixas. A resposta das coníferas austrais será uma maior especialização para a vida em zonas menos favoráveis (maior frio, seca ou solos menos próprios), o que lhes garantiu a diversidade, mas restringiu a quantidade e área de abrangência (KUNZMANN, 2007b).

No Cenozóico, um novo pico de irradiação ocorre no Eoceno, uma fase caracterizada por calor e chuvas abundantes, o que estende sua ocorrência até a Antártica. Data daí sua associação preferencial com as florestas pluviais, as áreas um pouco mais elevadas e a borda dos continentes submetida a clima oceânico. A grande diversidade de nichos resultantes da criação de novos continentes, cadeias de montanhas e oceanos propiciou o aparecimento de

formações vegetais de caráter “misto”, termo igualmente empregado para seus biomas modernos, respectivamente por Rambo (1951) e Schmithüssen (1966). Embora afastadas no tempo por cerca de 40 milhões de anos, essas floras guardam grandes semelhanças (DUTRA; STRANZ, 2003).

Muitas vezes, e em especial em sedimentos do início do Mesozóico, podem estar ainda associados a partes vegetativas de pteridospermas (HERBST, 1966) ou compartilhar caracteres com outros grupos de gimnospermas, dificultando ainda mais sua identificação. É importante, por isso, saber que em formas modernas da família o xilema secundário é picnoxílico, com pontoações areoladas hexagonais e unisseriais, raramente bisseriais, dispostas de forma alternada nas paredes radiais das traqueídes (pontoação araucarióide), sem canais resiníferos, com espessamentos espiralados e parênquima axial (STEWART, 1987; MARCHIORI, 1996). Duas ou mais séries de pontoações poligonais podem estar presentes (TAYLOR; TAYLOR 1993; MEYEN, 1987).

Nas folhas e ramos, o arranjo helicoidal e a disposição verticilada têm sido, respectivamente, considerados diagnósticos, embora possam aparecer em outras gimnospermas (STEWART, 1987; MEYEN, 1987). A forma das folhas é variável e igualmente pode ser compartilhada. A constatação de que em araucárias modernas folhas distintas possam estar presentes mesmo em um único ramo (como em *Araucaria heterophylla*) ou em ramos jovens e adultos de uma mesma espécie acabou por conduzir a propostas complexas de classificação (HARRIS, 1979).

Stewart (1987), buscando simplificar a abordagem, propõe distingui-las entre os fósseis em dois tipos principais: o braquifílico, para as pequenas, tetragonais e falcadas, quando são atribuídas ao morfogênero *Brachyphyllum* (como em *Brachyphyllum mamillare* Brongniart 1828), e o linearfílico, para as de forma alongada e aplainadas, subsésseis, em geral designadas a *Pagiophyllum*.

Esta afinidade originou, por seu turno, novos conflitos, já que alguns paleobotânicos incluem *Brachyphyllum* ora nas Cheirolepidiaceae, uma família extinta de coníferas (MEYEN, 1987), ora em Podocarpaceae ou Taxodiaceae (DEL FUEYO, 1991).

Convencionou-se, contudo, que, a partir do final do Mesozoico (Figura 06), relações com os gêneros modernos já podem ser estabelecidas. De qualquer modo, na ausência de



cutículas (preservadas nas compressões e mumificações) ou de estruturas reprodutivas, é muito difícil separar os diferentes grupos de coníferas entre os fósseis (MEYEN, 1987).

Lamentavelmente, esta é uma condição rara num grupo cuja história sempre foi mais distante dos corpos d'água e ligada a ambientes continentais oxidantes. Somente a partir do Terciário, com o aumento da umidade, restos de epiderme puderam ser resgatados das cutículas e permitiram uma afinidade mais segura com as Araucariaceae (DUTRA; STRANZ, 2003).

Atualmente a família está restrita ao Hemisfério Sul e Ásia Austral, e com registro geológico dominante também no Hemisfério Sul e escasso no Hemisfério Norte durante o Mesozoico. São árvores de grande porte, atingindo de 10 a 35 metros de altura, perenifólias, com tronco reto e quase cilíndrico e coroas altas com ramos pseudoverticilados. Possuem folhas simples, alternas, espiraladas, lineares e lanceoladas, coriáceas (GUERRA-SOMMER; PIRES, 2011).

São utilizadas como árvores de plantio ornamental e paisagístico em alguns países, devido ao seu porte diferenciado e fascinante, como por exemplo, *Araucaria araucana* e *Araucaria heterophylla* (SALISBURY, 1807).

Araucariaceae é uma família distinta das gimnospermas sem afinidades próximas de outras famílias atuais; filogeneticamente, Araucariaceae é um grupo irmão das Podocarpaceae (incluindo Phyllocladaceae); de Cupressaceae, Taxaceae, Cephalotaxaceae e Sciadopityaceae (STEFANOVIC' et al., 1998). Isso também é claramente indicado pela morfologia diferenciada de cone nas sementes (FARJON 2001, 2005). Araucariaceae e Podocarpaceae como exemplares típicos do 'hemisfério sul' são famílias que compartilham um ancestral comum (MILLER, 1988).

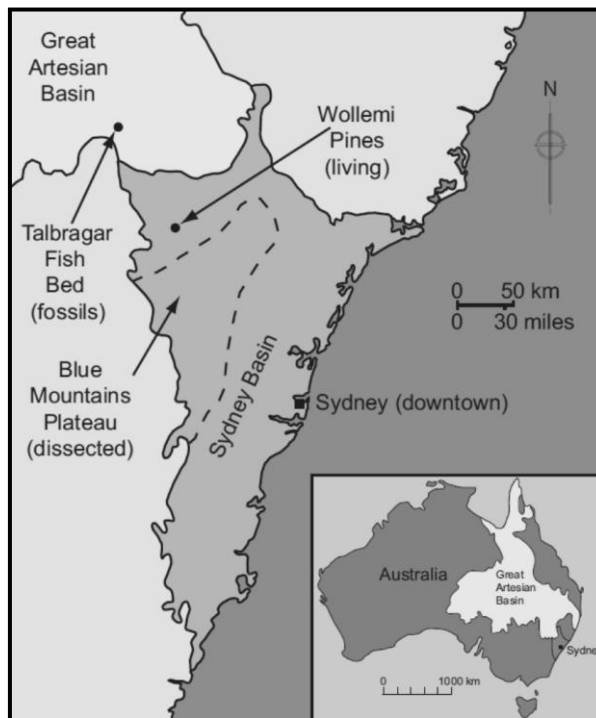
A Nova Caledônia é a região mais diversificada, com 13 espécies do gênero *Araucaria*, das 19 espécies conhecidas. Todas as 13 são endêmicas das ilhas e pertencem à seção *Eutacta* Link. Em todas as outras regiões, *Araucaria* tem apenas uma ou duas espécies (FARJON, 2001).

O gênero *Wollemia* é monotípico e recentemente descoberto em um desfiladeiro de arenito profundo nas Montanhas Azuis do Parque Nacional de Wollemi, a 150 Km de Sydney, na Austrália, no ano de 1994, por David Noble. Sendo considerada a conífera vivente mais antiga do mundo. Elas estavam localizadas em uma área remota de cânions areníticos dentro



do parque, fato que se remete a dificuldade em ser descoberta. Estudos genéticos estimam que o espécime mais velho deve ter em torno de 1000 anos (SNELLIG, 2006).

Figura 07 – Região de ocorrência de *Wollemia nobilis*.



Fonte: Adaptado de Snelling, 2006.

Os indivíduos de *Wollemia nobilis* formam uma pequena população constituída por cerca de 40 árvores adultas. As relações filogenéticas dentro da família com base em conceitos morfológicos estão bem estabelecidas, fornecem evidências de que o gênero *Wollemia* é mais estreitamente relacionado com *Agathis* do que com *Araucaria* (KUNZMANN, 2007a). Dos três gêneros que compõem a família moderna, *Wollemia* é representado por uma única espécie, *Wollemia nobilis* Jones, Hill e Allen (JONES et al., 1995), e exclusivo do sudeste da Austrália (Figura 07).

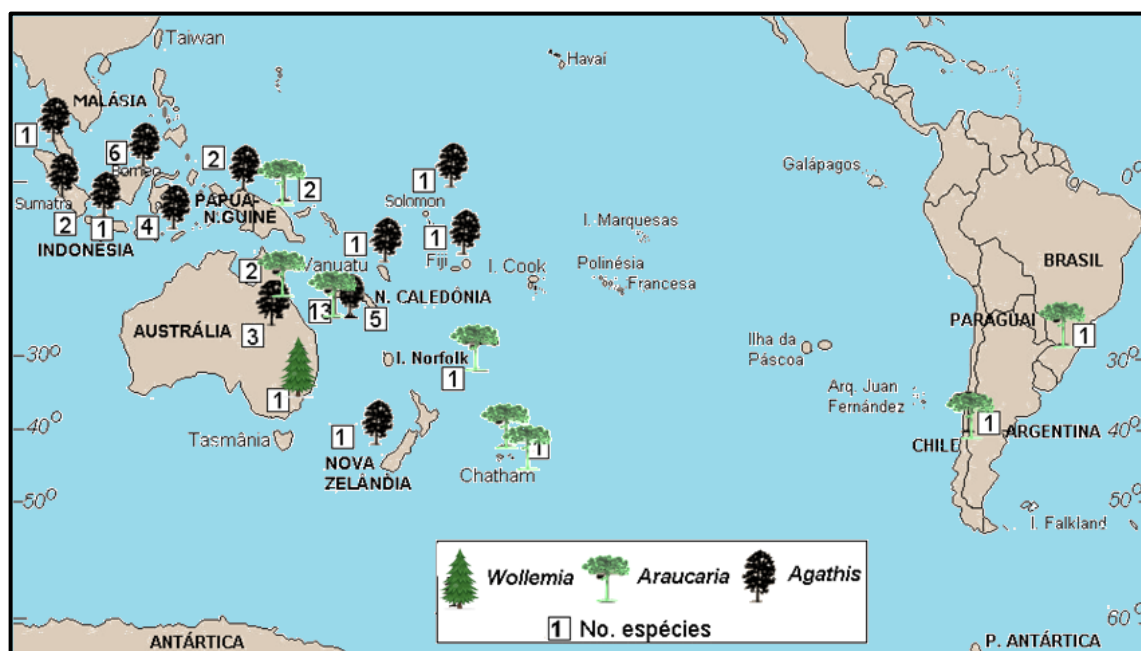
O pólen de *Wollemia* é idêntico ao fossilizado de *Dilwynites granulatus*, abundante na Austrália do Cretáceo médio ao Terciário médio (94-30 m.a.) (Macphail et al, 1995). *Wollemia* possuía distribuição maior neste período. As folhas de *Wollemia nobilis* são idênticas ao seu suposto ancestral fóssil, *Agathis jurrasica* (150 m.a., final do Jurássico). De acordo com os dados disponíveis, a idade estimada de *Wollemia nobilis* é entre 200-90 milhões de anos, e sua origem ainda permanece um enigma (GILMORE, HILL, 1997; SETOUGUCHI et al., 1998; STEVANOVIC et al., 1998).

O gênero *Agathis* possui 20 espécies e é exclusivo da Australásia e ilha norte da Nova Zelândia; sendo *Araucaria* spp é o mais abundante, diversificado e com maior amplitude geográfica (Figura 08).

Há 4 secções de *Araucaria* spp: (i) *Araucaria*, exclusiva da América do Sul e com duas espécies (*Araucaria angustifolia* e *Araucaria araucana*); (ii) *Bunya*, restrita a Austrália e representada pela espécie *Araucaria bidwilli*; (iii) *Intermedia*, também com uma única espécie, *Araucaria hunsteinii* da Nova Guiné; (iv) *Eutacta*, que possui o maior número de espécies (15) e a mais ampla distribuição geográfica, mas limitada ao setor oriental (Nova Guiné, Austrália, ilhas Norfolk e Nova Caledônia) (SETOGUCHI et al., 1998).

Para Kershaw e Wagstaff (2001), a abrangência espacial da secção *Eutacta* poderia representar uma maior antiguidade no registro geológico. Este argumento não encontra, contudo, sustentação nem entre os caracteres presentes nos primeiros fósseis, nem como mecanismo evolutivo esperado diante das grandes mudanças ambientais que passou o planeta ao longo de sua história mesozóica.

Figura 08 – Distribuição geográfica e número de espécies dos gêneros modernos de Araucariaceae.



FONTE: Adaptado de Dutra e Stranz, 2003.

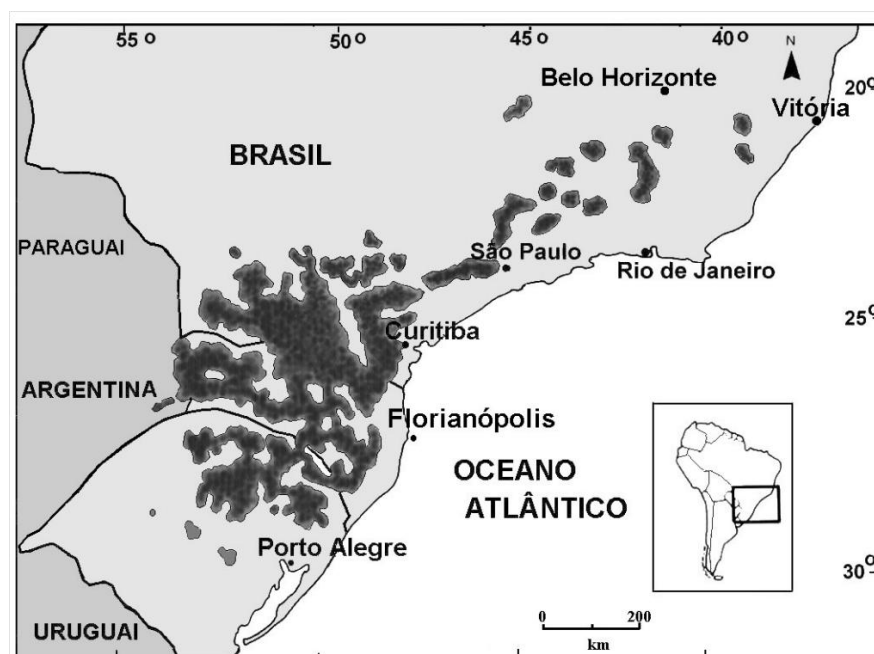
*Araucaria angustifolia*, o pinheiro-brasileiro (Figura 09), apresenta uma distribuição entre as longitudes de 45°W e 55°W e entre os paralelos 20°S e 29°S. Além das áreas do sul do Brasil (Figura 08), aparece ainda no nordeste da Província de Misiones, Argentina, onde se

desenvolve em uma pequena área, cujo limite sul é a cidade de San Pedro e coincidente com os declives orientais dos rios que descem da Serra Central da Província (RAGONESE; CASTIGLIONE, 1946; CABRERA, 1951; PARODI, 2002).

Essa espécie caracteriza a Floresta Ombrófila Mista ou com Araucária (KLEIN, 1960; CARVALHO, 1994; MATTOS, 1994; RIZZINI, 1997; TEIXEIRA et al., 1986; VELOSO et al., 1991; LEITE, 2002), uma formação de climas muito úmidos e que associa elementos tropicais afro-brasileiros a tipos temperados, de origem austral (352 espécies, segundo LEITE, 2002).

Constituía o elemento dominante e, muitas vezes, o mais abundante no dossel, o que conferia uma fisionomia própria às formações. Podem ocorrer ainda, na borda sul e leste dos *canyons* que margeiam as elevações, compondo a Formação Montana (LEITE; KLEIN 1990, LEITE 2002). Sua ocorrência também está os vales onde se alinham, acompanhando os sistemas de drenagem, sujeitos a inundações ocasionais (Formação Aluvial) e em “capões” ou fragmentos de mata.

Figura 09 - Distribuição de *Araucaria angustifolia* no Brasil.



Fonte: Dutra e Stranz, 2003.

Outra forma é na parte mais elevada do planalto coberta por campos de altitude, onde ocupam as porções protegidas das nascentes dos rios (Formação Altomontana). Nas áreas mais baixas de savana podem aparecer como indivíduos isolados e, em geral, mais jovens.

Esta última paisagem é a dominante no Rio Grande do Sul e considerada relíquia de climas anteriores mais secos (HUECK, 1952; RAMBO, 1956; HUECK, 1961; LEITE, 2002; QUADROS; PILLAR, 2002; MARCHIORI, 2002), um aspecto que concorda com os espectros polínicos quaternários disponíveis (LORSCHETTER, 1983; BEHLING, 1997; BEHLING, 2002).

*Araucaria araucana* é a única outra espécie americana, distribuída entre as latitudes de 37°30'S e 39°48'S (Zona de Araucana), coincidindo em parte, no Chile, com as Florestas Valdivianas (RECHENE; BAVA, 2003).

Apresenta uma distribuição disjunta em dois núcleos principais. O primeiro é mais contínuo abrange ambos os lados da Cordilheira dos Andes e desenvolve-se, como esperado, sobre solos derivados do vulcanismo. O segundo consiste de dois pequenos fragmentos de mata junto à Cordilheira de Nahuelbuta, próximo ao Oceano Pacífico, formada por rochas graníticas, metamórficas (ARMESTO et al., 1995) e sedimentares (PERALTA, 1980), que originam solos arenosos, bem drenados e ácidos. As altitudes variam entre os 1.800 a 1.400 metros no norte e 600 metros no sul, para ambas as ocorrências. A pluviosidade varia entre os 1.500 mm e 3.000 mm/m/ano, na costa, com máximos de 5.000 mm/m/ano (VEBLEN et al., 1995).

No Chile, as florestas remanescentes de *Araucaria araucana* estendem-se atualmente sobre 253.715 ha, dos quais 122.679 ha (48,4%) se encontram em Parques Nacionais (MUJICA, 2003). Na Argentina, Rechene e Bava (2003), por meio de mapeamento por fotos aéreas, encontraram 40% de florestas originais ainda intactas atribuindo como fatores de degradação dessas florestas à exploração, os incêndios e o uso pastoril (Figura 09).

As formas do Hemisfério Sul têm sua regeneração restringida em solos muito férteis e úmidos e em zonas de clima quente, onde as pteridófitas e angiospermas são favorecidas (exceção feita a alguns tipos de *Podocarpus*). Assim podem viver em locais caracterizados por grande perturbação ambiental e solos instáveis (OGDEN; STEWART, 1995), lixiviados, secos ou congelados e mais empobrecidos em nutrientes, onde a possibilidade de desenvolvimento do estrato superior da floresta de angiospermas seja reduzida, garantindo-lhes a luz (ROGERS, 1954; KLEIN, 1960; BACKES, 1973; FERRI, 1980; BOND, 1989).

Cestaro (1988) aponta uma redução de 94% da luminosidade no interior da mata de pinheiros no sul do Brasil em relação às áreas de campo. *Araucaria araucana*, *Araucaria*

*hunsteinii*, *Agathis australis* e algumas Cupressaceae e Taxaceae, por exemplo, costumam formar conjuntos densos após perturbações pelo fogo, deslizamentos, enxurradas e erupções vulcânicas (ENRIGHT; OGDEN 1995).

Figura 10 - Distribuição de *Araucaria araucana* no Chile e na Argentina.



Fonte: Dutra e Stranz, 2003.

Veblen et al. (1995), chamam a atenção para a coincidência entre a distribuição moderna de *Araucaria araucana* (Figura 10) e as áreas submetidas a vulcanismo ativo, onde seria a primeira colonizadora das terras, junto com *Nothofagus antarctica*.

Rechene e Bava (2003) por meio de estudos silvícolas para *Araucaria araucana* na Argentina, também descrevem os solos provenientes da alteração de cinzas vulcânicas como sendo a litologia preferencial para a distribuição da espécie. As cinzas sofrem um processo de erosão, que dá lugar a argilas de diferentes características (alofanização), que aumentam a capacidade de retenção de umidade e compostos orgânicos. Estas características permitem o desenvolvimento da floresta, mesmo quando ocorre um verão com déficit hídrico.

Atualmente, os representantes de Araucariaceae distribuem-se em grande parte junto a áreas elevadas e bem iluminadas, submetidas a um tectonismo ativo e dotadas de solos de pequena espessura, litólicos e ácidos, em zonas de clima oceânico mesotérmico, das latitudes

subtropicais a tropicais. Os sistemas de ventos alíseos e contra-alíseos e das frentes polares, aos quais se superimpõem os efeitos do El Niño e da Convergência do Atlântico Sul, concentrando bons teores de umidade no sul do Brasil e oeste chileno, parecem ter grande efeito sobre sua distribuição na América do Sul (MUJICA, 2003).

A ideia subjacente à moderna fitogeografia, da associação das coníferas aos climas frios, não é válida, portanto, para as Araucariaceae, com exceção, talvez, da forma chilena *Araucaria araucana* (KERSHAW; WAGSTAFF, 2001), de distribuição temperada.

Os parâmetros vistos e a longa história geológica mostram o valor que as formas associadas à família possuem na avaliação do clima e da geografia pretéritas, tornando seu estudo especialmente valioso para geólogos e paleobotânicos. Mesmo quando sua resposta aos ambientes reflete um processo localizado e regional, se associada a outros parâmetros mais globais, permite o refinamento dos dados (DUTRA; STRANZ, 2003).

Por outro lado, o exame do registro pode ser útil àqueles que almejam compreender seu atual comportamento e garantir sua conservação. Demonstra que possuíram sempre uma dinâmica própria e uma resposta aos momentos de desequilíbrio, refugiando-se nas áreas mais protegidas, onde sobreviveram a muitos eventos catastróficos. Se for garantida a proteção de seus biomas, serão capazes de manter-se e expandir reconquistando as áreas num constante processo de evolução (VEBLEN et al., 1995).

Sua marcada resiliência aos episódios catastróficos, aos efeitos das mudanças ambientais e às pragas induzidas por animais, que garantiram sua persistência no tempo, comprovam sua aptidão para projetos de restauração. Enquanto as plantas com flores, em que pese sua rápida recuperação posterior, sofrem com esses eventos, as coníferas sobrevivem com custos mínimos e poderão continuar a coexistir, como no passado, com os distintos grupos de plantas e suas novidades evolutivas (DUTRA; STRANZ, 2003).

## **2.5 Anatomia do Lenho de Gimnosperma**

Em relação as angiospermas, o lenho das gimnospermas pode ser considerado mais simples, pois sua composição é basicamente traqueídes e raios (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

Por uma análise tecnológica, as gimnospermas, constituem o grupo produtor das chamadas “madeiras macias” ou de “fibras longas”. Assim denominados, por não apresentar dureza da madeira e pela predominância de traqueídes longitudinais no lenho, que conferem certa homogeneidade ao mesmo e desempenham, cumulativamente, as funções de condução e sustentação mecânica, incluindo-se entre as maiores células da natureza, uma vez que variam de 2000 a 6000  $\mu\text{m}$  (MARCHIORI, 1996).

Em relação à madeira, as gimnospermas, consideradas mais primitivas e de constituição anatômica mais simples do que as angiospermas, apresentam menor número de caracteres anatômicos, dificultando o diagnóstico das espécies (GREGUSS, 1955; BURGER; RICHTER, 1991). Sendo formadas, basicamente, por traqueídes axiais, que chegam a compor 90% do volume da madeira, somando as demais estruturas (raios, parênquima axial, canais resiníferos) percentuais modestos no conjunto do lenho (BURGER; RICHTER, 1991).

Os traqueídes axiais ocorrem em todas as gimnospermas, com exceção das *Gnetales*, que são providas de elementos vasculares verdadeiros (MARCHIORI, 1996; JUDD et al., 2009). Dentre as características de valor diagnóstico para o gênero ou grupo de gêneros salientam-se: o tipo de pontuação no campo de cruzamento (CUTLER et al., 2011; BURGER; RICHTER, 1991); a presença de espessamentos espiralados; a forma e arranjo das pontuações areoladas; a presença e arranjo do parênquima axial; a ocorrência e natureza de canais resiníferos; a presença de raios fusiformes, traqueídes radiais e cristais, além de detalhes especiais em torus e crássulas (ESTEBAN et. al, 1999; IAWA, 2004).

O estudo da anatomia de gimnosperma tem por finalidade para este trabalho, o reconhecimento microscópico do lenho, portanto foram destacadas estruturas de interesse para a análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV), já que as modificações anatômicas que são geralmente observadas no carvão vegetal fóssil incluem dados analisados apenas em MEV, como parede celular homogeneizada, estrutura das traqueídes, pontuações e raios.

Em relação ao caule das gimnospermas, o crescimento secundário inicia-se cedo e leva à formação de uma quantidade substancial de xilema secundário ou lenho. O xilema secundário é produzido para o interior do câmbio vascular e o floema secundário é produzido para fora. O xilema das gimnospermas é constituído principalmente por traqueídes, enquanto o floema consiste em células crivadas, que são as células condutoras de substâncias orgânicas típicas das gimnospermas. Os dois tipos de tecidos são percorridos radialmente por raios

estreitos. Com o início do crescimento secundário, a epiderme acaba por ser substituída por uma periderme, que é um tecido de proteção e que tem sua origem na camada externa das células do córtex (RAVEN, 2014).

Em nível celular, a característica mais significativa da célula vegetal é a presença da parede, que envolve externamente a membrana plasmática e o conteúdo celular. Células sem paredes são raras e ocorrem, por exemplo, durante a formação do endosperma de algumas angiospermas e de embriões de gimnospermas (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

Esta estrutura é permeável à água e a várias substâncias, e desempenha funções, como prevenir a ruptura da membrana plasmática pela entrada de água na célula, ser portadora de enzimas relacionadas a vários processos metabólicos e atuar na defesa contra bactérias e fungos. A parede celular é parte dinâmica da célula vegetal e passa por modificações durante o crescimento e desenvolvimento desta célula (RAVEN, 2014).

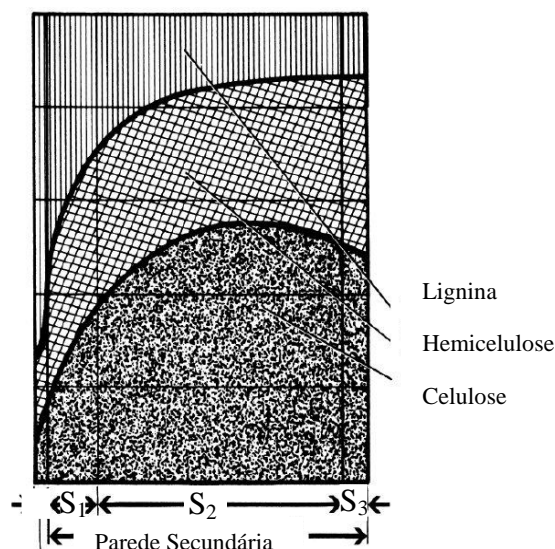
Já a estrutura da parede celular, compõe-se de microfibrilas de celulose, imersas em uma matriz contendo polissacarídeos não-celulósicos: hemiceluloses e pectinas. A microfibrila de celulose é uma estrutura filamentosa que tem cerca de 10 a 25 nm de diâmetro e comprimento indeterminado; é composta de 30 a 100 moléculas de celulose, que se unem paralelamente por meio de pontes de hidrogênio (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

A parede celular forma-se externamente à membrana plasmática, sendo as primeiras camadas a parede primária, onde a deposição das microfibrilas ocorre por arranjo entrelaçado. Entre as paredes primárias de duas células está presente a lamela média. Em muitas células, a parede primária é a única que permanece. Em outras, internamente à parede primária ocorre a deposição de camadas adicionais, que constituem a parede secundária. Nesta parede, as microfibrilas são depositadas por arranjo ordenado (RAVEN, 2014).

Estas camadas da parede secundária são denominadas S1, S2 e S3, respectivamente, sendo delimitadas pela mudança de orientação da deposição, que varia nas diferentes camadas (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006). As paredes diferem em espessura, composição e propriedades físicas nas diferentes células (Figura 11). A última camada (S3) pode faltar. A união entre duas células adjacentes é efetuada através da lamela mediana, que freqüentemente se apresenta delgada e tem natureza péctica (RAVEN, 2014).



Figura 11 – Distribuição de componentes orgânicos nas paredes celulares de gimnospermas.

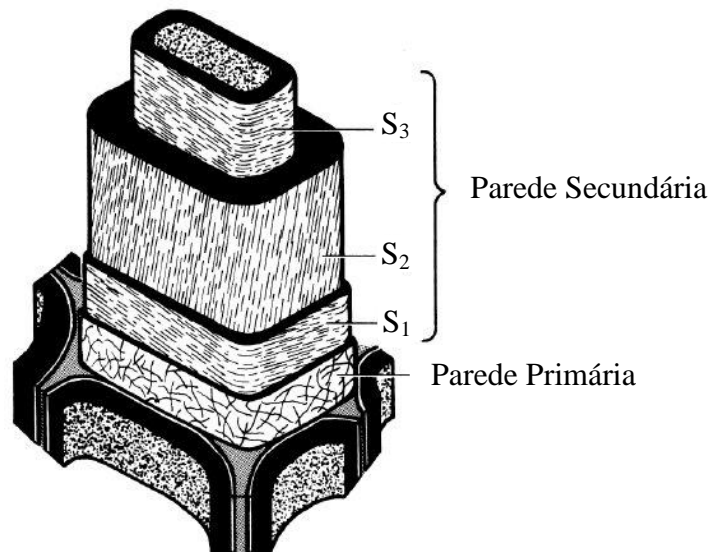


Fonte: Adaptado de Panshin e Zeeuw, 1980

A parede primária é mais espessada que a lamela média e geralmente se mostra bem mais fina em comparação à parede secundária (Figura 12). A parede primária possui alto teor de água, já a parede secundária possui um teor de água reduzido, devido à deposição de lignina, que é um polímero hidrofóbico (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

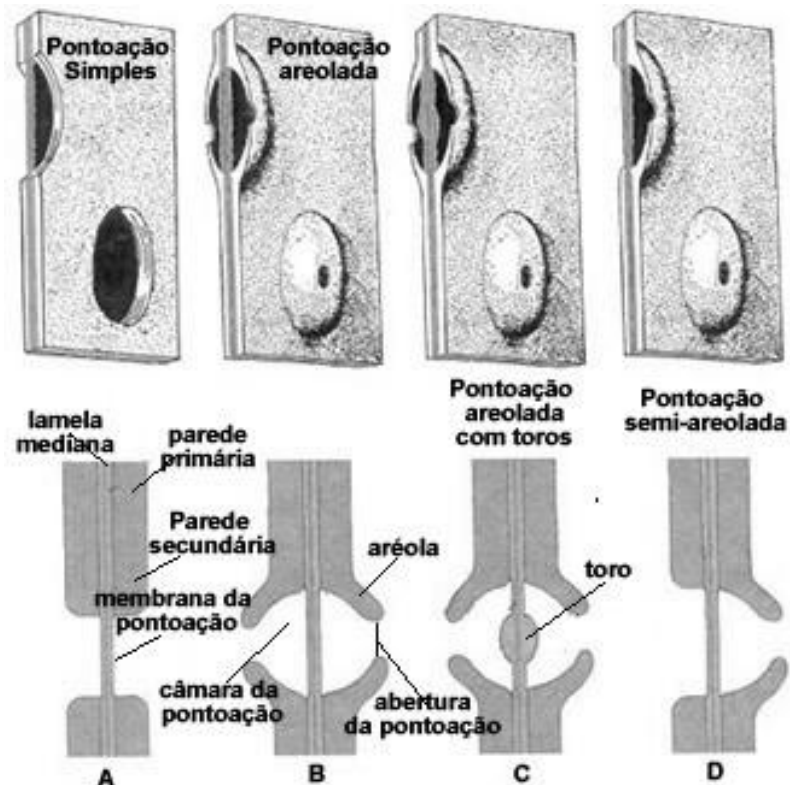
Outra característica anatômica são as pontoações, que são elementos celulares do xilema secundário. Podem ser pontoações simples e, ou, areoladas. As pontoações simples ocorrem nas fibras libriformes e nas células do parênquima axial e radial. As areoladas são encontradas nos elementos de vaso, traqueídes e fibrotraqueídes. Nas pontoações areoladas, a parede secundária forma uma projeção sobre a cavidade da pontoação - a câmara da pontoação -, deixando no centro uma abertura - o poro, ou abertura da aréola (Figura 13) (RAVEN, 2014).

Figura 12 – Camadas da parede celular de uma célula madura.



Fonte: Adaptado de Shmulsky e Jones, 2011.

Figura 13 – Esquema de diferenciadas pontuações: pontuações simples e pontuações areolada.

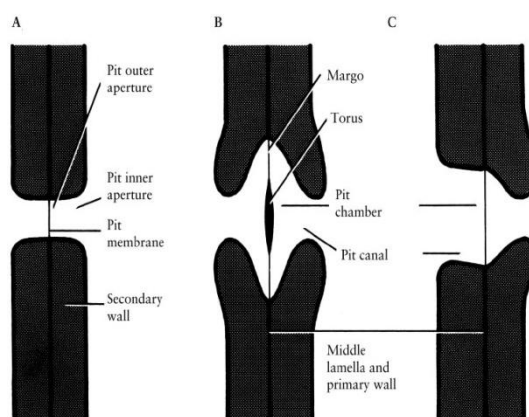


Fonte: A-D modificado de Burger-Richter, 1991 e Preston in Treiber, 1957.

Nas traqueídes, a membrana primária da pontuação apresenta espessamento central, denominado torus, que é sustentado pelo margo, porção da parede em que as microfibrilas de

celulose apresentam arranjo frouxo, reticulado e que circunda o torus (Figura 14). O diâmetro do tórus é de um terço para metade total da câmara, e o diâmetro da abertura é aproximadamente metade do diâmetro do tórus (TAYLOR, 1978).

Figura 14 – Formação do Tórus.



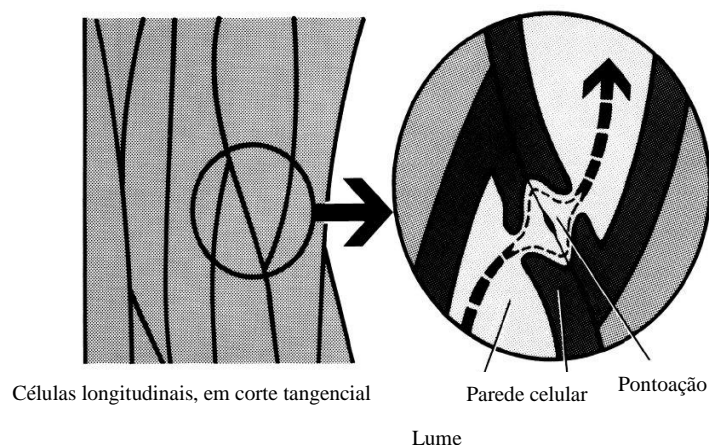
Fonte: Shmulsky e Jones, 2011.

Para a identificação de lenhos de gimnospermas, utiliza-se as pontoações, pois podem variar quanto ao aspecto, arranjo, extensão e profundidade. Quanto ao arranjo, as pontoações podem ser classificadas em: opostas e alternas. Esta pontoação nem sempre é observada com clareza ao microscópio de luz, sendo melhor evidenciada ao microscópio eletrônico de varredura (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

O número de pontoações por traqueíde pode variar de 50 a 300 pontoações em traqueídes de lenho inicial, sendo menor no tardio (SIAU, 1971). Segundo Sjostrom (1981), os traqueídes de lenho precoce, apresentam aproximadamente 200 pontoações areoladas, com o diâmetro radial nos traqueídes menor em traqueíde de lenho precoce e mais grossas em traqueíde de lenho tardio, com diâmetro tangencial variando entre 15µm e 80µm, de acordo com as espécies, e o comprimento de 1.200 µm até 7.500 µm.

Quando nas paredes de duas células adjacentes existir pontoações que se correspondam, estas constituem um par de pontoações, que garantem a condução de água em uma árvore (Figura 15). Entre o par de pontoações, a porção da parede primária de cada uma das células adjacentes juntamente com a lamela média localizada próximo das cavidades do par de pontoações, formam a membrana da pontoação (SJOSTROM, 1981).

Figura 15 – Esquema de passagem de fluídos pelas pontoações.



Fonte: Shmulsky e Jones, 2011.

Os raios, assim como o parênquima axial, são responsáveis pelo armazenamento e translocação de água e solutos a curta distância, principalmente no sentido lateral. Os raios são compostos basicamente de três tipos de células parenquimáticas: procumbentes, eretas e quadradas. Célula procumbente é aquela que apresenta maior dimensão no sentido radial; a quadrada é aproximadamente isodiamétrica; e célula ereta apresenta sua maior dimensão no sentido axial (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

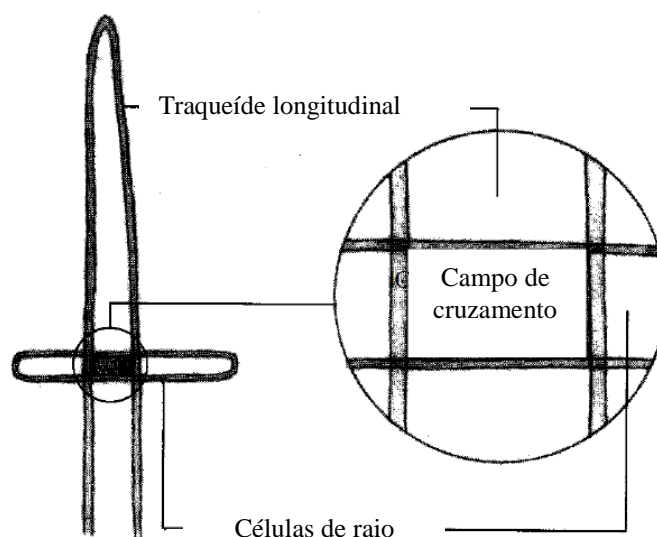
Mesmo que a estrutura anatômica do lenho carbonizado parece à primeira vista extremamente bem preservada, uma série de modificações são induzidas pela carbonificação. Grandes mudanças ocorrem nos campos de cruzamento, as alterações mais impressionantes ocorrem quando piceóides podem se tornar taxodióides depois da carbonização (GERARDS et al., 2007).

Pontoações alternadas ocorrem regularmente apenas em membros da família Araucariaceae, como em *Agathis*, *Araucaria*, *Wollemia*. Entre os exemplares de Pinaceae uma tendência de arranjo alternado pode ocasionalmente ser observado em *Cedrus* spp. e *Keteleeria* spp., quando as pontoações estão cheias. Estas pontoações podem ser distinguidas das de Araucariaceae pelo contorno circular e por a sua dimensão maior (PHILLIPS, 1948). As pontoações são geralmente opostas em todos os outros táxons com traqueídes

multisseriados, por exemplo, em *Larix* spp. (Pinaceae) e vários táxon de Cupressaceae, por exemplo, *Sequoia sempervirens*, *Taiwania cryptomerioides*, e *Taxodium*.

Os campos de cruzamento (Figura 16) são de fundamental importância para a identificação dos lenhos de coníferas. Entre as características das pontoações incluem, frequência, arranjo, forma, tamanho e/ou a posição das aberturas em relação à divisa das pontoações. Para esta lista de características, a IAWA (IAWA, 2004), recomenda as categorias definidas por Phillips (1948), incluindo o tipo Araucarioide. Os tipos de campos de cruzamento propostos para a descrição e identificação dos lenhos de coníferas são fenestriformes, pinóides, piceóides, cupressóides, taxodióides e araucarióides.

Figura 16 – Campo de cruzamento, com intersecção de um traqueíde longitudinal e uma célula de parênquima radial.



Fonte: Hoadley, 1990.

### 2.5.1 Descrição anatômica de *Araucaria angustifolia*

Possui camadas de crescimento variáveis em largura. Os raios na seção transversal são discretos, com paredes horizontais finas e sem pontoações. As paredes dos traqueídes são lisas e sem espessamento espiralado. Paredes tangenciais, predominantemente em lenhos tardios, com potuações areoladas. Estas são pouco em número, na maior parte destacadas, ou em duas ou três, acima uma da outra. Os contornos são bastante indistintos. As aberturas são circulares

ou elípticas curtas, mas mais frequentemente elípticas longas ou lenticulares. Nas paredes radiais de traqueídes as pontoações ocorrem em 1-3 colunas. Aberturas das pontoações predominantemente elípticas, nos traqueídes mais largos do lenho inicial por vezes circulares. As pontoações no campo de cruzamento são bastante grandes e variam em número. Quando poucos, são circulares, quando mais e em contato uns com os outros, eles geralmente ocupam toda a área do campo. O seu número varia de 1 a 9, quando 9, elas são dispostas em três, lado a lado, e sobrepostas. Suas aberturas são lenticulares ou fendidas, no lenho inicial, por vezes elípticas. As aberturas de orientação horizontal ou quase horizontal só foram encontradas em pontoações que surgiram da fusão de duas pontoações radialmente próximas umas das outras (Gregus, 1955).

### **2.5.2 Descrição anatômica de *Araucaria bidwillii***

Seus camadas de crescimento que são bastante indistintos, sua delimitação é marcada apenas pelas paredes mais espessas dos traqueídes do lenho tardio. Traqueídes em secção transversal maioritariamente arredondadas, ocasionalmente tetra ou poligonal. Paredes horizontais de células de raios lisas, sem pontoações. Raios comparativamente baixos: não mais de 1-6-8 células de altura. As paredes tangenciais de traqueídes são geralmente lisas, muito raramente com 1-2 pontoações areoladas solitárias. Paredes horizontais e tangenciais de raios lisos. Nos campos de cruzamento transversal 1-4 (5) pontoações, principalmente em linhas horizontais. Nas células marginais 4-6, dispostas irregularmente. As pontoações nas paredes dos traqueídes são às vezes dispostas em colunas longitudinais (Gregus, 1955).

### **2.5.3 Descrição anatômica de *Araucaria columnaris***

Apresenta camadas de crescimento muito indistintos, marcados apenas pelos traqueídes terminais tardios sendo ligeiramente menores. Traqueídes em secção transversal comumente arredondados, tetra- ou pentagonais, ocasionalmente irregulares. Células de parênquima ausentes. Nas paredes de traqueídes, as pontoações são irregulares, dispostas em duas colunas e alternadas, muito excepcionalmente em três. Células de raio em secção transversal em forma de barril. Na seção radial, as paredes dos traqueídes são lisas, ocasionalmente uniseriadas, mais frequentemente com pontoações bisseriadas alternadas.

Pontoações em três colunas são bastante raras, ocorrendo apenas em traqueídes de lenho inicial. O parênquima não foi observado na secção radial. No campo de cruzamento 4-12 pontoações com bordas claramente definidas e curto-elípticas, ligeiramente inclinadas ou aberturas verticais (Gregus, 1955).

# 3

## *MATERIAL E MÉTODOS*

---

*Inferências ambientais e taxonômicas com base em lenhos carbonizados:  
análise de alterações geradas pela carbonização artificial de Araucariaceae*





### 3 MATERIAL E MÉTODOS

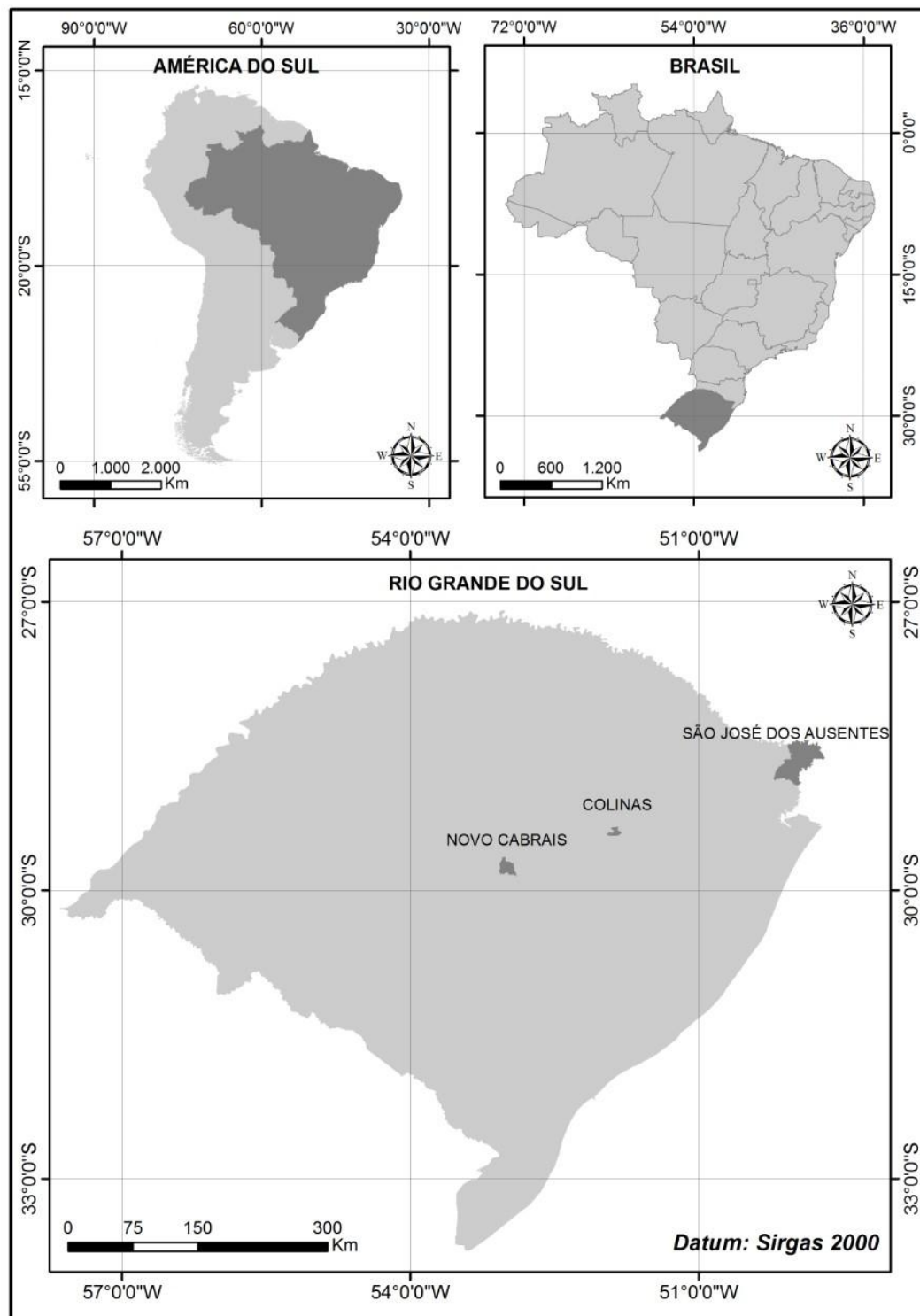
#### 3.1 Procedimentos de Coleta do Material Utilizado

Para a realização deste trabalho, amostras de lenho de *Araucaria* que cresciam em diferentes municípios do Rio Grande do Sul, Brasil, foram doados, a partir de vegetação suprimida com devido licenciamento ambiental. Foram utilizadas amostras de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, de São José dos Ausentes (28° 47' 06.56" S; 49° 58' 50.85" O), *Araucaria bidwillii* Hooker de Novos Cabrais (29° 47' 3.48"S; 52° 58' 14.59" O), e *Araucaria columnaris* (Forst.) Hooker de Colinas (29° 32' 28.84" S; 51° 50' 28.35" O) (Figura 17).

As amostras de *Araucaria* spp foram obtidas na forma de discos, em local com altura do peito de 1,50m. Os discos tinham uma espessura de 8,0 cm com um diâmetro variando entre 18,0 e 35,0 cm

A amostra do lenho de *Wollemia nobilis* W.G.Jones, K.D.Hill & J.M.Allen (Figura 18) utilizada para este trabalho foi coletada no Palmengarten Frankfurt (50° 07' 22.01" N e 8° 39' 29.87" L), Alemanha, Frankfurt am Main (Figura 19). Com dimensões de 2cm de espessura por 3 cm de diâmetro, sendo um indivíduo jovem, com idade aproximada de 5 anos. Foi dividida em duas partes, sendo uma destinada a coleção Paleobotânica do Museu de Ciências Naturais (MCN) da UNIVATES, tombada sob sigla PbUMCN, a outra parte da amostra foi novamente dividida em duas partes para realização dos estudos propostos neste trabalho.

Figura 17 – Mapa de Localização dos municípios de coleta das amostras de Araucariaceae utilizadas neste estudo.



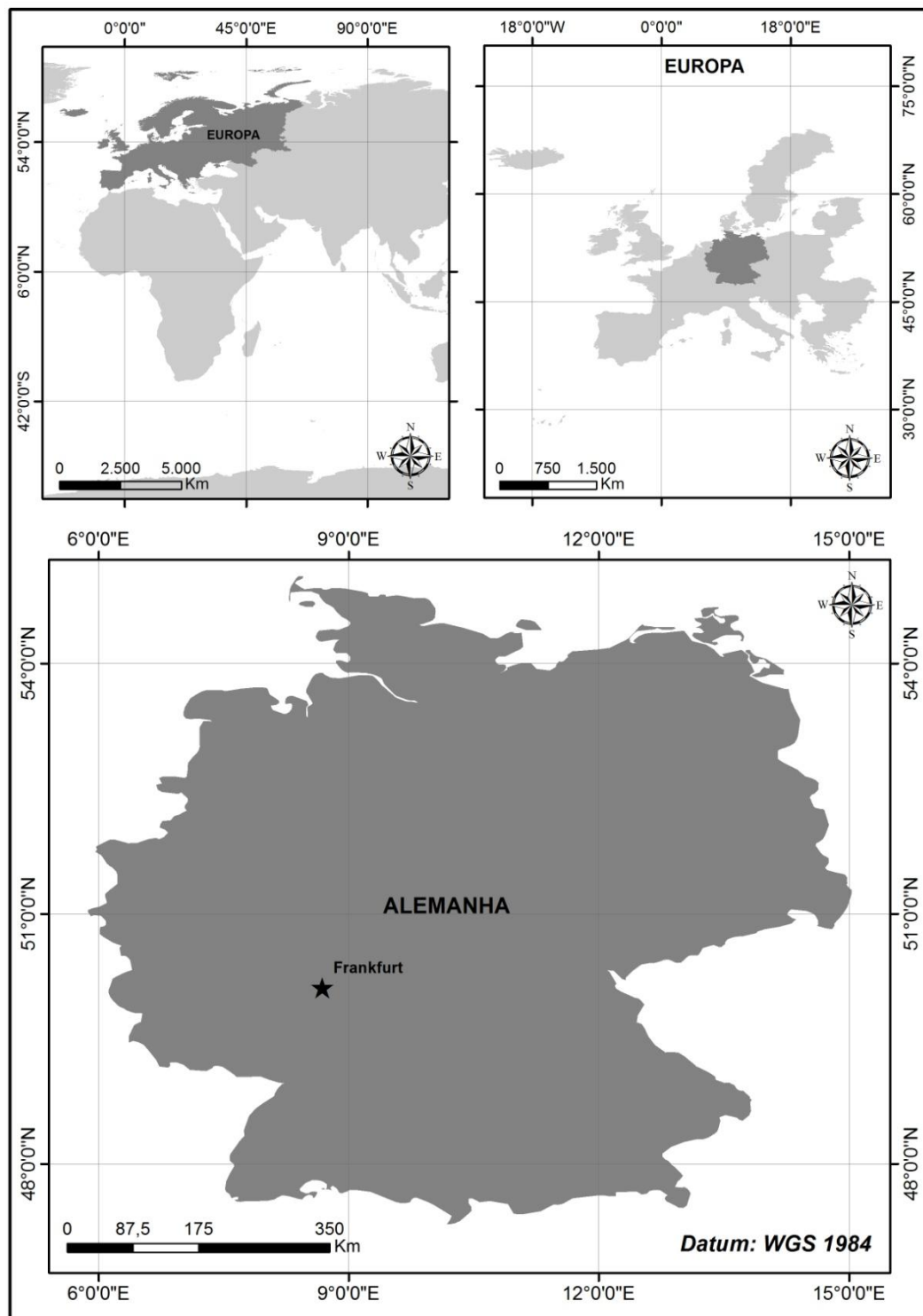
Fonte: Daniel Martins dos Santos.

Figura 18 – Exemplar de *Wollemia nobilis* localizado no *Palmengarten Frankfurt*.



Fonte: Da autora.

Figura 19 - Localização de Frankfurt, local de coleta da amostra de *Wollemia nobilis*.

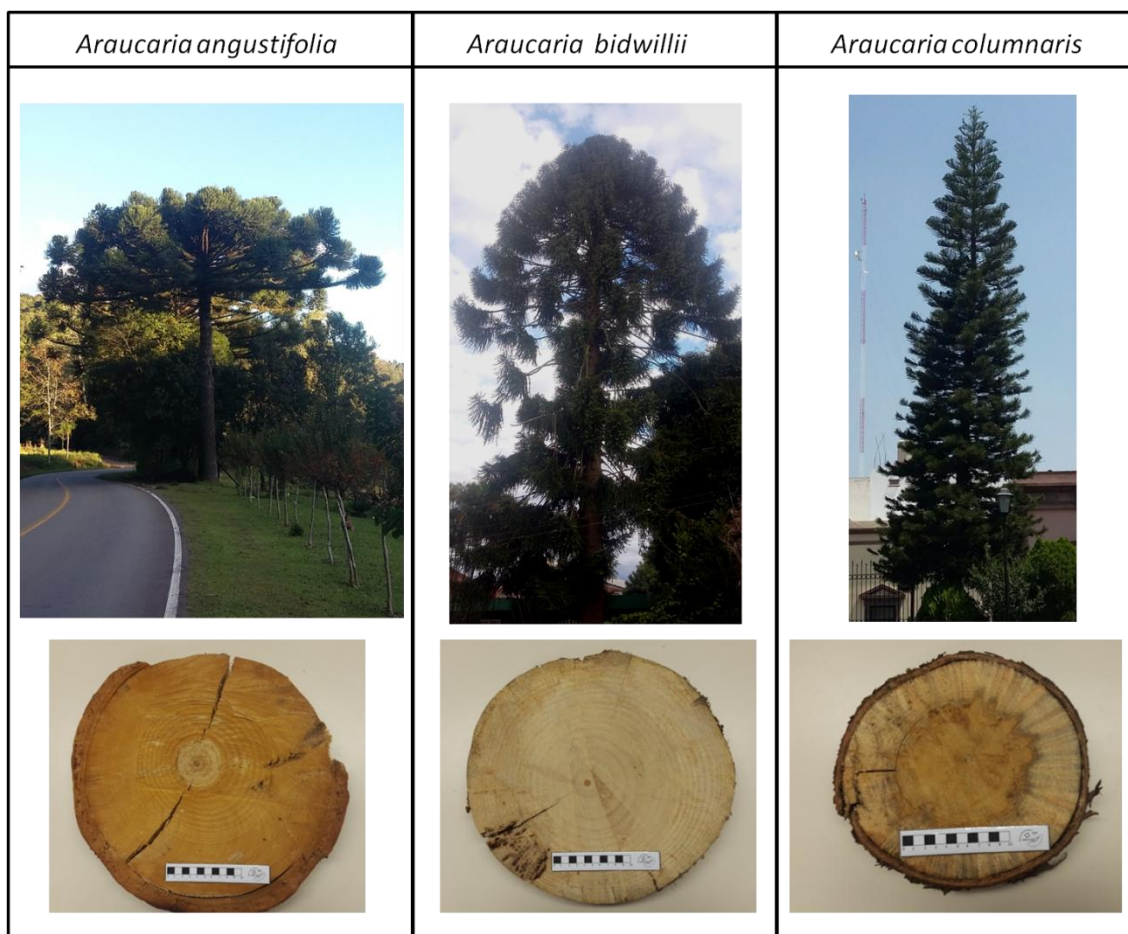


Fonte: Daniel Martins dos Santos

### 3.2 Fase de Processamento do Material em Laboratório

De cada um destes discos de *Araucaria* spp (Figura 20), foram retiradas amostras cúbicas com 1,0cm<sup>3</sup>, pesadas e depois colocadas num pote de porcelana (Chiarotti A-37), cobertas com areia (10g, Merck®) e carbonizadas em forno de mufla (SP-1200) com temperaturas variando de 50°C à 1000°C, durante 1 hora, com intervalo de 50°C. No total, as amostras de cada espécie foram carbonizadas a 20 temperaturas diferentes, e 6 amostras de cada táxon foram carbonizadas para cada temperatura.

Figura 20 – Representação das espécies de Araucariaceae coletadas (não sendo os exemplares suprimidos) e os lenhos de cada espécie suprimida utilizados neste trabalho.



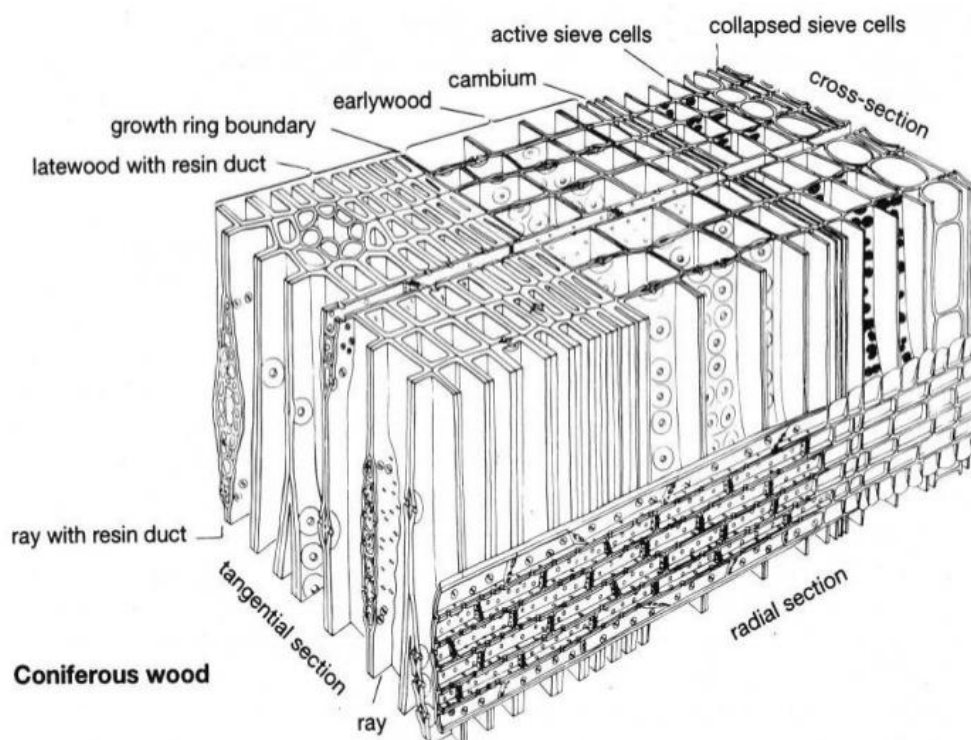
Fonte: Da autora.

Após a carbonização, as amostras foram arrefecidas em um dessecador e o carvão vegetal foi novamente pesado em uma balança de precisão (Polimate PL2000). A perda de massa do carvão foi expressa em percentagem nos cubos de lenhos originais.

A cor das amostras foi analisada em cada temperatura, observada a olho nu, e detectada visualmente a diferença antes e depois da carbonização.

Para análise anatômica dos carvões, as amostras foram fraturadas para revelar os três planos estruturais: seção transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial (Figura 21), com o auxílio de um estereomicroscópio, estilete e formão. Após foram montados stubs de alumínio usando fita dupla face e analisados sob microscopia eletrônica de varredura (MEV - Zeiss EVO LS15) no Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (Tecnovates) na UNIVATES (Figura 22).

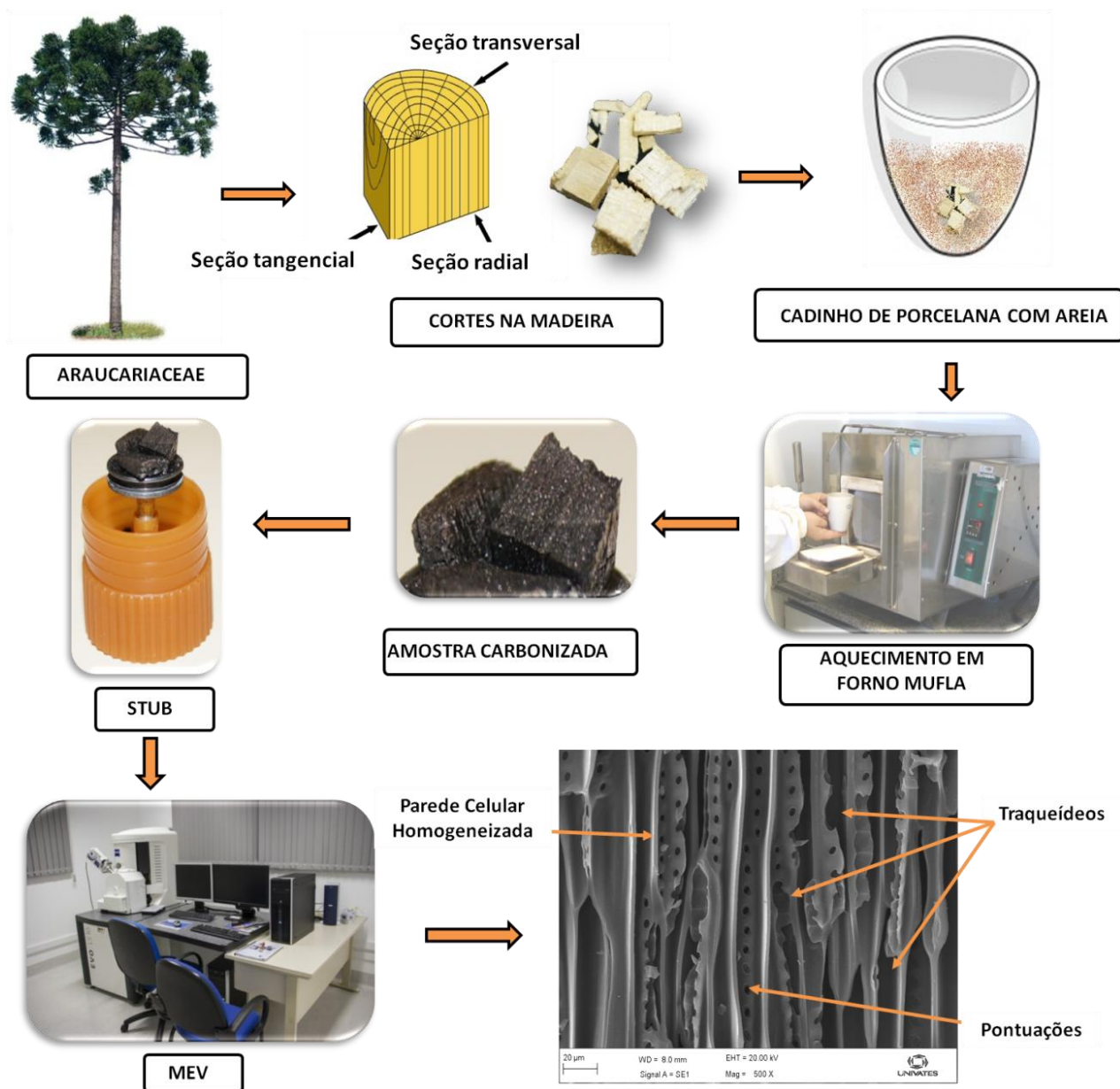
Figura 21 - Bloco de madeira com os três cortes e traqueídes, raios e pontoações.



Fonte: <https://www.slideshare.net/cliffalph/wood-types-12285168>



Figura 22 – Esquema da metodologia usada para carbonização artificial de lenhos , utilizada em todas as espécies deste estudo.



Fonte: Da autora

Para a amostra de *Wollemia nobilis* foi realizada a carbonização sob uma temperatura de 400°C durante 60 minutos, caracterizando a amostra como carbonizada. Nesta temperatura já ocorre a homogeneização das paredes celulares das amostras de lenho da família Araucariaceae. Após o resfriamento da amostra carbonizada, foram efetuados os cortes nos três planos de observação (tangencial, radial e transversal) sob uma lupa estereoscópica Zeiss Stemi 2000C e com auxílio de uma lâmina de barbear, similar ao proposto por Kučera (1981).

Outra parte do lenho foi imersa em água destilada por 3 dias a uma temperatura de 20°C. Passado este período, a amostra foi seca com papel toalha e posteriormente seca em estufa, a 40°C, por 24h, como feito por Heady et al. (2002). Nesta amostra também foram realizados os cortes nos três planos de observação, seguindo o mesmo método utilizado com a amostra carbonizada. Segundo Kučera (1981), a utilização de lâminas de barbear proporciona um corte mais limpo, necessário para uma boa visualização das estruturas sobre Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), além de ser um corte simples e prático.

### **3.3 Captura das Imagens em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Mensuração dos Caracteres Anatômicos**

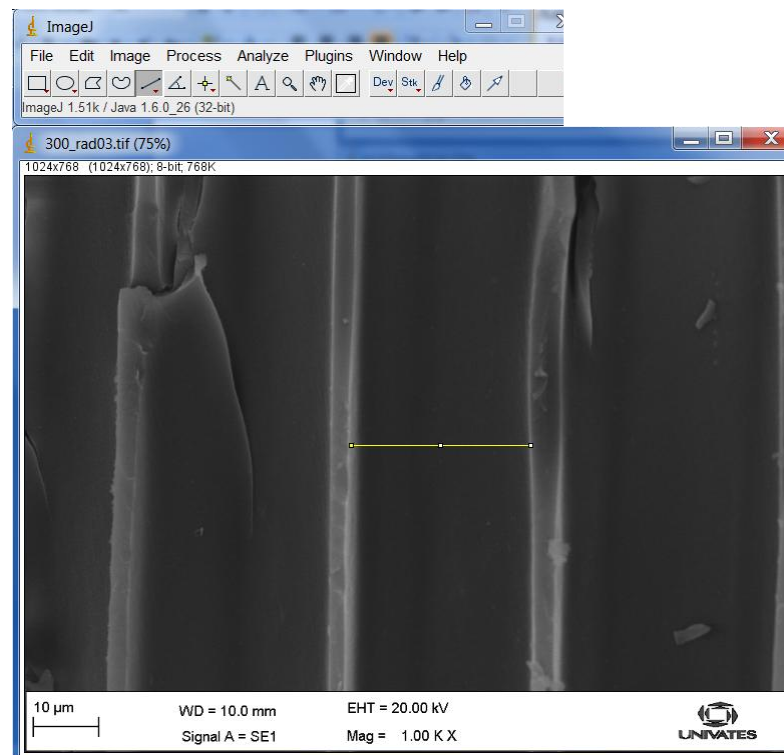
Após as amostras serem preparadas em stubs para a análise em Microscópio Eletrônico de Varredura, MEV (ZEISS EVO LS10), junto ao Tecnovates/UNIVATES, as mesmas foram submetidas primeiramente a uma metalização, em equipamento específico para recobrimento das amostras não condutoras, sendo utilizado recobrimento por deposição de íons de ouro (Au).

Após a preparação do MEV para recebimento das amostras e início das análises, as mesmas foram observadas em diferentes aumentos no microscópio, em cada espécime, em cada temperatura e em cada corte específico, totalizando 195 amostras analisadas.

As caracterizações e medições dos caracteres anatômicos dos lenhos e do carvão vegetal foram feitas de acordo com as recomendações da lista IAWA de características microscópicas para a identificação de lenhos de Gimnospermas (IAWA, 2004). A determinação de características anatômicas qualitativas em *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwilli* e *Araucaria columnaris* foram feitas com o auxílio do software ImageJ, baseadas em 25 mensurações dos seguintes atributos: (i) diâmetro tangencial da traqueíde ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 23), (ii) diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 24), (iii) largura dos raios ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 25), (iv) altura do raio ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 26), (v) diâmetro das pontoações no campo de cruzamento ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 27), (vi) diâmetro das pontoações na seção radial ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 28) e (vii) diâmetro das pontoações na seção tangencial ( $\mu\text{m}$ ) (Figura 29). Estas estruturas anatômicas quantitativas do lenho são as mesmas observadas na descrição de lenho da família Araucariaceae usada por Greguss (1955) e Esteban et al. (2002).

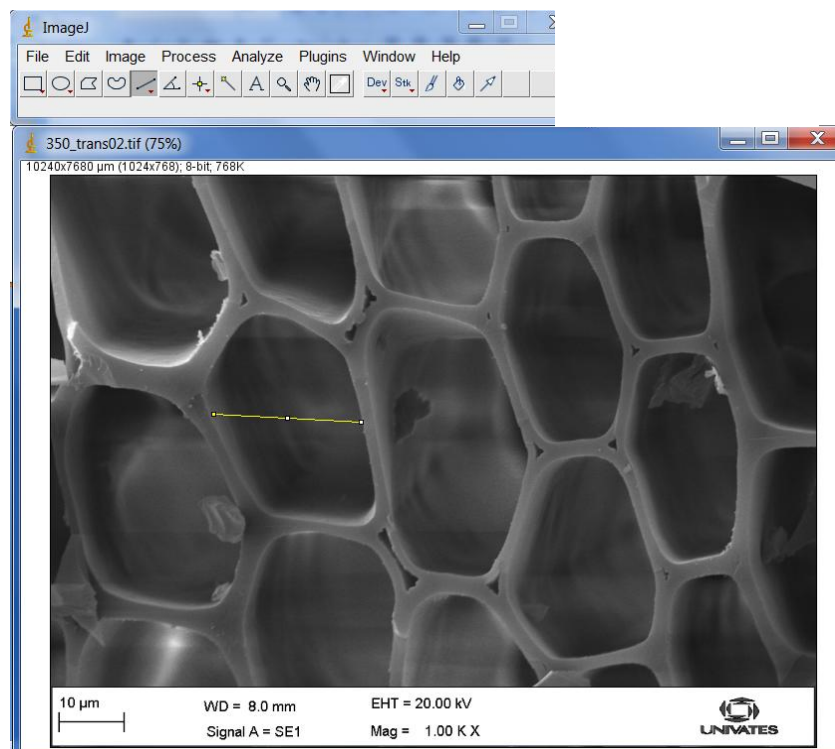


Figura 23 – Largura da traqueíde (linha amarela).



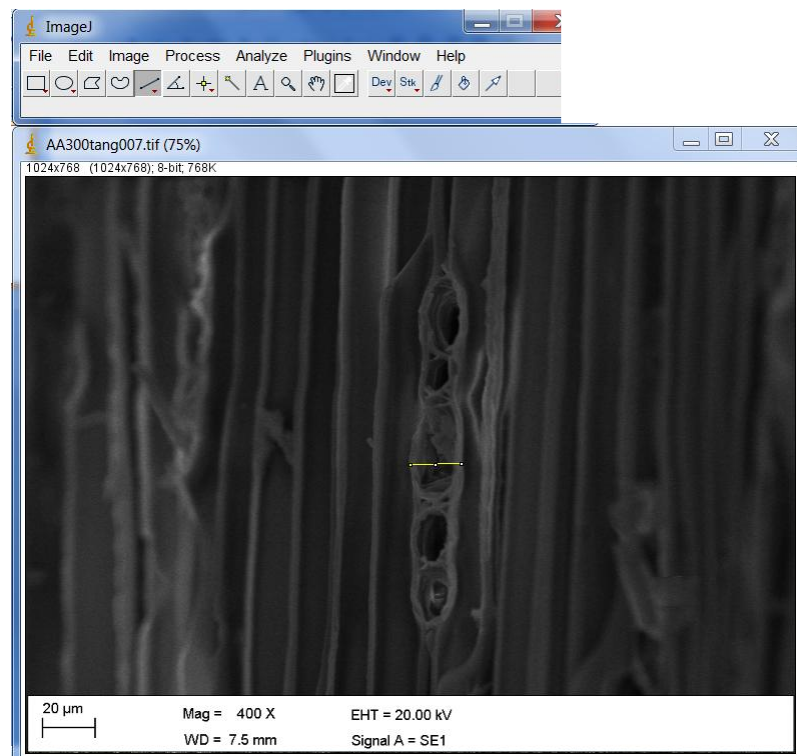
Fonte: Da autora

Figura 24 – Largura do lume (linha amarela).



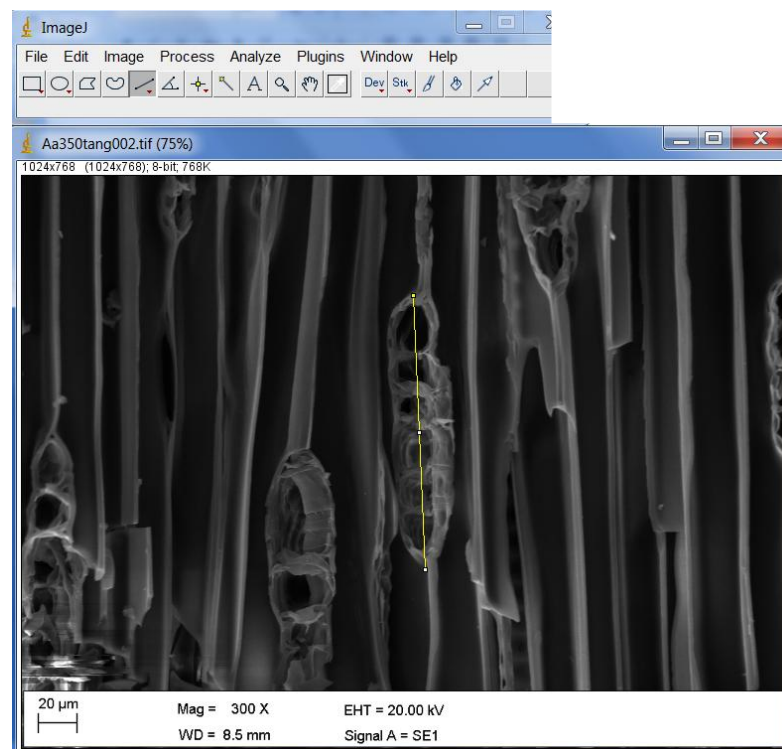
Fonte: Da autora.

Figura 25 – Largura de um raio (linha amarela).



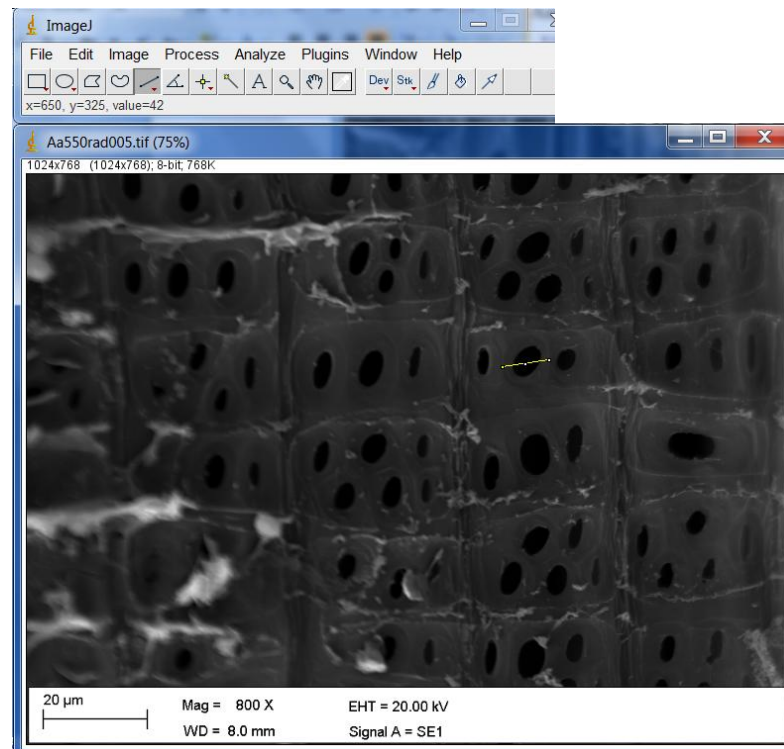
Fonte: Da autora

Figura 26 – Altura de um raio (linha amarela).



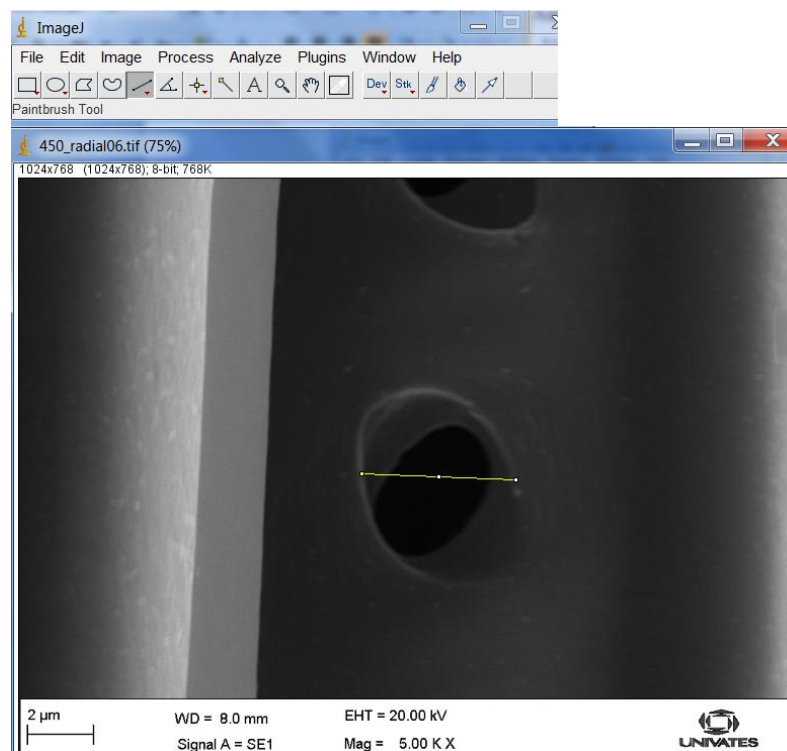
Fonte: Da autora

Figura 27 – Diâmetro tangencial da abertura da pontoação (linha amarela) no campo de cruzamento.



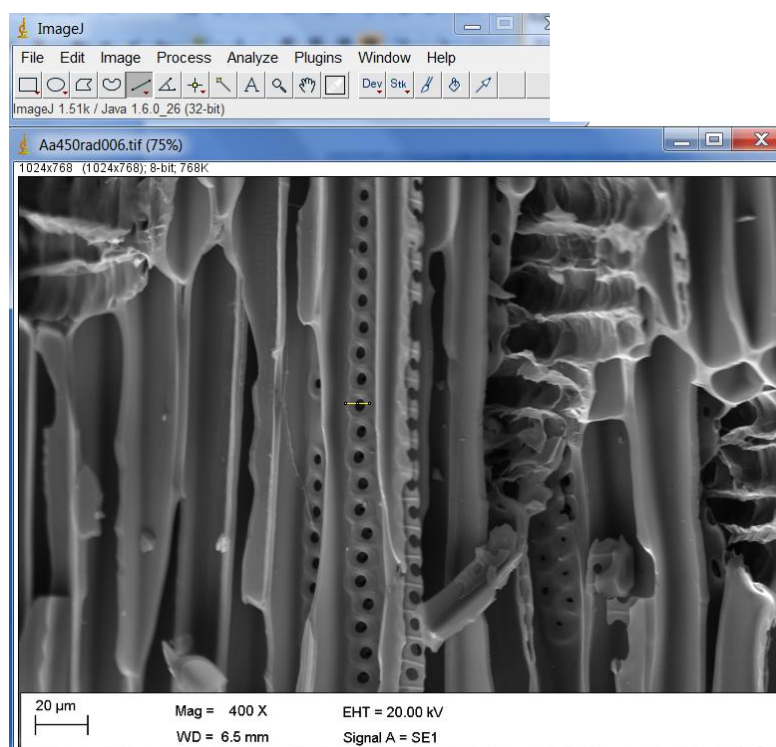
Fonte: Da autora

Figura 28 – Largura de uma pontoação (linha amarela) .



Fonte: Da autora

Figura 29 – Realização da medição da largura de uma pontuação (linha amarela) em corte tangencial utilizando o Software ImageJ.

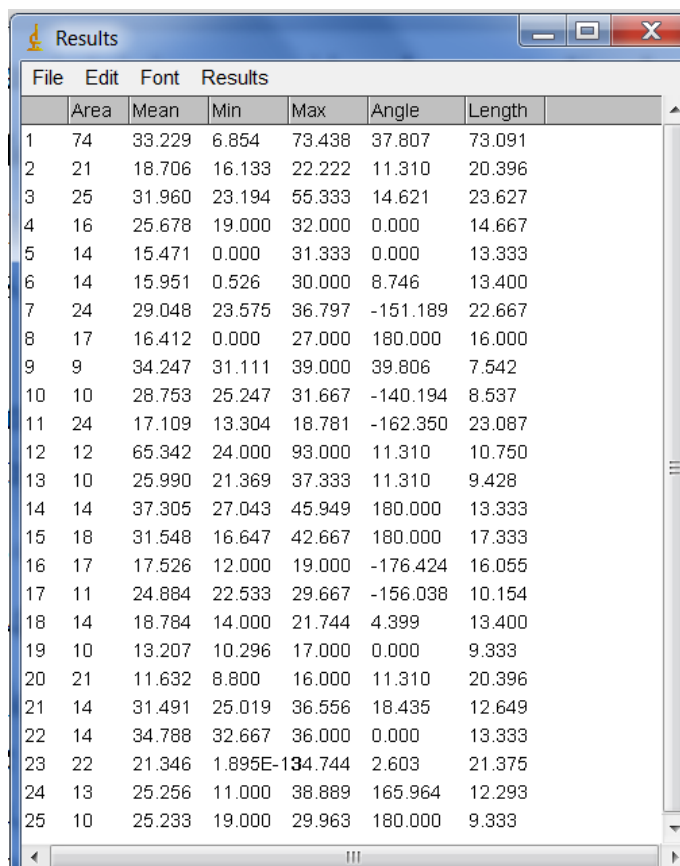


Fonte: Da autora

Nas imagens obtidas de *Wollemia nobilis* também foram realizadas medições de características anatômicas conforme as recomendações do IAWA List of Microscopic Features for Softwood Identification (IAWA, 2004), como, o diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ ), diâmetro das pontuações nos campos de cruzamento ( $\mu\text{m}$ ), e no corte radial largura dos traqueídes ( $\mu\text{m}$ ) e altura e largura dos raios ( $\mu\text{m}$ ), utilizando o software ImageJ (RASBAND, 1997-2014). Para cada característica anatômica e cada imagem analisada, foram efetuadas 50 medições aleatórias.

Após obtidas as medições dos caracteres anatômicos de todas as espécies, em cada temperatura, transferiu-se as tabelas para o software ImageJ (Figura 30) para a análise estatística.

Figura 30 – Exemplo de captura de 25 medidas de comprimento realizadas pelo software ImageJ.



The screenshot shows the 'Results' window in ImageJ. It contains a table with 7 columns: 'Area', 'Mean', 'Min', 'Max', 'Angle', and 'Length'. The table lists 25 rows of data, numbered 1 to 25. The 'Area' column contains values ranging from 9 to 74. The 'Mean' column contains values ranging from 11.632 to 34.247. The 'Min' column contains values ranging from 0.000 to 31.111. The 'Max' column contains values ranging from 16.000 to 37.438. The 'Angle' column contains values ranging from -176.424 to 180.000. The 'Length' column contains values ranging from 7.542 to 23.627.

	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	74	33.229	6.854	73.438	37.807	73.091
2	21	18.706	16.133	22.222	11.310	20.396
3	25	31.960	23.194	55.333	14.621	23.627
4	16	25.678	19.000	32.000	0.000	14.667
5	14	15.471	0.000	31.333	0.000	13.333
6	14	15.951	0.526	30.000	8.746	13.400
7	24	29.048	23.575	36.797	-151.189	22.667
8	17	16.412	0.000	27.000	180.000	16.000
9	9	34.247	31.111	39.000	39.806	7.542
10	10	28.753	25.247	31.667	-140.194	8.537
11	24	17.109	13.304	18.781	-162.350	23.087
12	12	65.342	24.000	93.000	11.310	10.750
13	10	25.990	21.369	37.333	11.310	9.428
14	14	37.305	27.043	45.949	180.000	13.333
15	18	31.548	16.647	42.667	180.000	17.333
16	17	17.526	12.000	19.000	-176.424	16.055
17	11	24.884	22.533	29.667	-156.038	10.154
18	14	18.784	14.000	21.744	4.399	13.400
19	10	13.207	10.296	17.000	0.000	9.333
20	21	11.632	8.800	16.000	11.310	20.396
21	14	31.491	25.019	36.556	18.435	12.649
22	14	34.788	32.667	36.000	0.000	13.333
23	22	21.346	1.895E-13	34.744	2.603	21.375
24	13	25.256	11.000	38.889	165.964	12.293
25	10	25.233	19.000	29.963	180.000	9.333

Fonte: Da autora

### 3.4 Métodos Estatísticos aplicados

Os dados obtidos nas medições de cada caractere anatômico em cada temperatura de carbonização foram analisados utilizando o modelo de Regressão Linear Bivariada, com auxílio do software Past (HAMMER et al., 2001).

Para análise de regressão foram testadas regressões lineares, polinomiais, quadráticas e exponenciais. Embora para algumas variáveis a regressão polinomial de ordem superior (4-5) produziu bons resultados, devido ao número relativamente pequeno de medidas, houve uma dispersão considerável dos dados, relacionado à variabilidade intrínseca dentro e entre camadas de crescimento. Sendo a Regressão Linear Bivariada a opção que melhor se enquadrou para análise das variações anatômicas mensuradas.

Este teste faz a análise de duas variáveis para ver se existe correlação entre elas e a força do relacionamento entre elas, sendo a representação gráfica um diagrama de dispersão. O coeficiente de correlação supõe que a associação entre as variáveis seja linear, ou seja, expressa por uma reta ou linha.



# 4

## ***CAPÍTULO 3: RESULTADOS***

---

*Inferências ambientais e taxonômicas com base em lenhos carbonizados:  
análise de alterações geradas pela carbonização artificial de Araucariaceae*



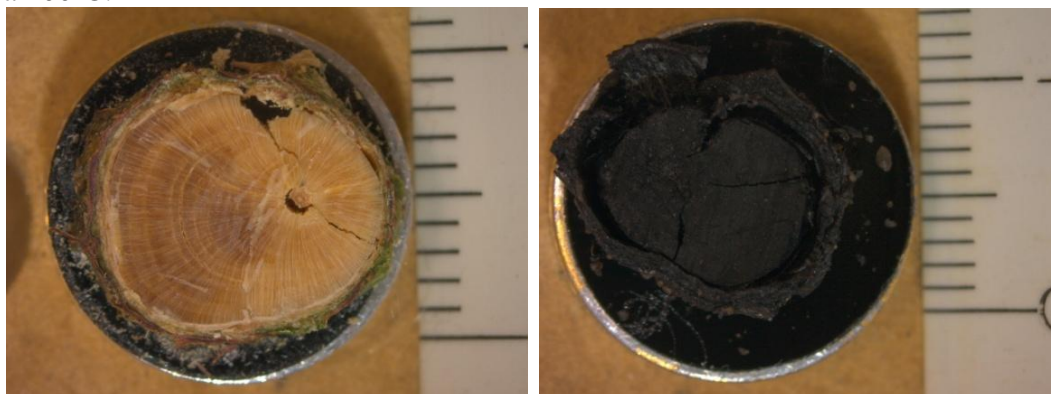
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Tamanho e forma

As amostras permaneceram intactas em tamanho e forma nas temperaturas de 50°C a 150°C. Após 200°C, a largura e a altura das peças diminuíram, tornando os cubos cada vez menores (Figura 31). Os exemplares de Araucariaceae sofreram aumento de retração com o aumento das temperaturas. Acima de 600°C, as amostras tornaram-se cada vez mais frágeis e frequentemente fragmentadas se tocadas. A 850°C as amostras de *Araucaria bidwilli* e *Araucaria columnaris* são completamente destruídas, permanecendo apenas cinzas. O mesmo ocorre com *Araucaria angustifolia* a 900°C.

Em *Wollemia nobilis*, a carbonização ocorreu apenas em 400°C, devido a disponibilidade de amostras, apenas foi perceptível a diminuição das amostras em altura e largura, como as demais Araucariaceae, não sendo detectada a temperatura que a amostra se desintegra, restando apenas cinzas.

Figura 31 – Teste realizado para comprovar a retração do diâmetro antes e após carbonização, realizado com ramo de *Araucaria columnaris*, comparando a amostra *in natura* e carbonizada a 400°C.



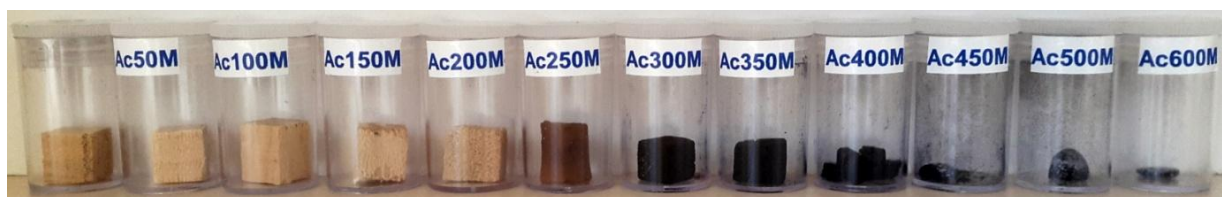
Fonte: Da Autora.



## 4.2 Cor

As amostras mudaram de cor de castanho claro para castanho escuro em temperaturas até 250°C e depois para cor negra a 300°C, observadas a olho nu (Figura 32). A fragilidade aumentou com a temperatura, sendo que as maiores mudanças ocorreram entre 250°C e 300°C para *Araucaria angustifolia* e *Araucaria bidwilli*, 300°C e 350°C para *Araucaria columnaris*, e 400°C para *Wollemia nobilis* (única temperatura de carbonização), analisadas visualmente. Também foi observado um brilho sedoso entre estas temperaturas em todas as amostras carbonizadas artificialmente.

Figura 32 – Amostras de *Araucaria columnaris* em cada tratamento térmico, sendo possível observar as diferentes colorações, desde a amostra do lenho sem tratamento térmico até a cor negra, percebendo a diferença entre 250°C e 300°C, temperatura em que o lenho vira CARVÃO VEGETAL.



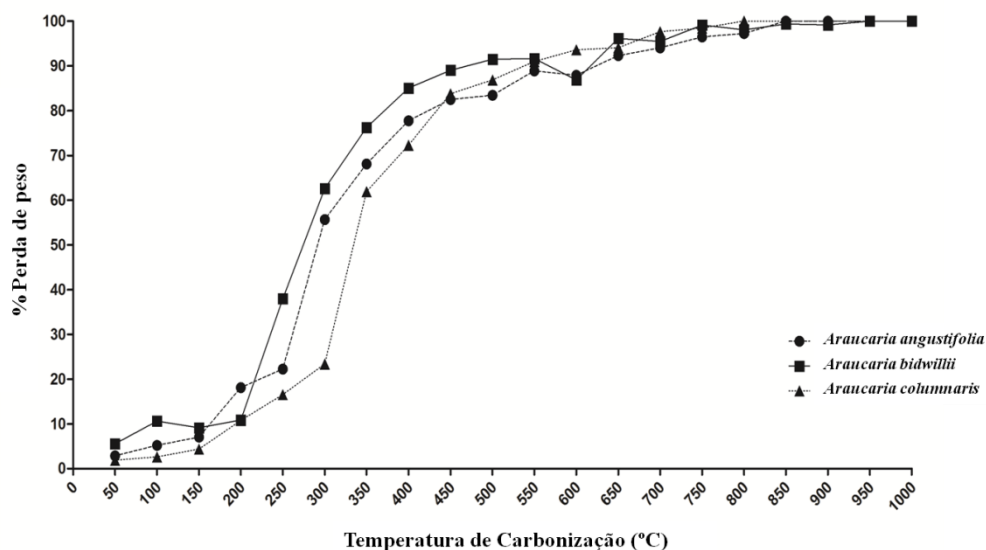
Fonte: Daniela Mueller de Lara.

## 4.3 Perda de massa

Outra característica observada foi a percentagem de perda de massa durante a carbonização. Em temperaturas mais baixas, até 150°C, esta ficou expressa por cerca de 10%, mas em 300°C variou de 20% em *Araucaria columnaris* a aproximadamente 60% em *Araucaria angustifolia* e *Araucaria bidwillii*. A perda de massa aumentou significativamente em temperaturas de carbonização entre 300-350°C. Após carbonização a 500°C, todas as espécies perderam aproximadamente 80% do seu peso inicial e após carbonização a 650°C perderam 90% (Figura 33).

As amostras de *Wollemia nobilis* perderam 77% da sua massa inicial, na carbonização a 400°C.

Figura 33 – Gráfico representando a perda de massa pós carbonização das amostras de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwillii* e *Araucaria columnaris*.



Fonte: Da autora.

#### 4.4 Comparação anatômica

Foi realizada a comparação das espécies com a literatura existente (GREGUS, 1955; ESTEBAN et al., 2002 (Tabela 1). Todos os caracteres aqui apresentados estão semelhantes com a literatura: como o diâmetro dos traqueídes (em *Araucaria columnaris* a média é 13,22µm, Gregus: 10-12µm), diâmetro do lume (em *Araucaria bidwillii* a média é 30,88µm, Gregus: 35-40µm, em *Araucaria columnaris* a média é 20,91µm, Gregus: 20-22µm), diâmetro das pontoações nos campos de cruzamento (em *Araucaria angustifolia* a média é 7,52µm, Gregus: 7-9µm e Esteban et al.: 6-11µm), diâmetro das pontoações em seção radial (em *Araucaria bidwillii* a média é 13,44µm, Gregus: 15-20µm e Esteban et al.: 10-15µm), diâmetro das pontoações em seção tangencial (a média é 10,32µm, Esteban et al.: ≥ 5µm). Para largura e altura dos raios não há dados disponíveis na literatura, apenas o número de células de raios.

Tabela 1 – Expressão numérica das mensurações dos caracteres anatômicos do presente estudo *versus* a literatura existente. A – Média das 25 medições de Araucariaceae, B – Valores de Gregus, 1955, C – Valores de Steban et al., 2002.

		Diâmetro dos traqueídes em corte tangencial (µm)	Diâmetro do lumen (µm)	Largura dos raios (µm)	Altura dos raios (µm)	Diâmetro das pontuações em campo de cruzamento (µm)	Diâmetro das pontuações em corte radial (µm)	Diâmetro das pontuações em corte tangencial (µm)
<i>Araucaria angustifolia</i>	A	31,81	27,06	20,24	107,09	7,52	12,83	10,32
	B	-	-	-	-	7 – 9	-	-
	C	-	-	-	-	6 – 11	10 - 15	≥5
<i>Araucaria bidwillii</i>	A	37,86	30,88	19,55	189,79	10,71	13,44	9,85
	B	-	35 – 40	-	-	7 – 11	15 - 20	-
	C	-	-	-	-	6 – 15	10 - 15	-
<i>Araucaria columnaris</i>	A	13,22	20,91	21,53	119,05	8,17	12,05	9,35
	B	10 – 12	20 – 22	-	-	9 – 11	16 - 17	12 – 13
	C	-	-	-	-	6- 15	10 - 15	≥5

Fonte: Da autora.

As observações na anatomia de *Wollemia nobilis*, de um lenho juvenil, revelam traqueídes poligonais ou quadrados em seção transversal e apresentam espaço intracelular entre as paredes celulares dos traqueídes. O diâmetro radial dos traqueídes apresenta média de 13,21µm, o lumen apresenta média de 14,17µm, as pontuações areoladas são geralmente uniseriadas, ocasionalmente biseriadas e alternadas, no campo de cruzamento apresentam média de 8,91µm. A altura dos raios possui média de 40,87µm e a largura dos raios possui média 17,08µm. O número de células de raio varia de 1 a 4. O número de pontuações no campo de cruzamento varia de 2-8. As pontuações são do tipo Araucarioide.

Com a obtenção das medições de *Wollemia nobilis*, foi realizada a comparação das mesmas com o trabalho de Heady et al., 2002 (Tabela 2), em que analisou indivíduos jovens em seus aspectos anatômicos, sendo que a amostra deste estudo se enquadra nas medições feitas pelos autores para indivíduos juvenis.

Tabela 2 – Expressão numérica das mensurações dos caracteres anatômicos do presente estudo *versus* a literatura existente. A – Média das 50 medições de *Wollemia nobilis* B– Valores de Heady et al, 2002.

		Diâmetro dos traqueídes em corte radial (µm)	Diâmetro do lumen (µm)	n° de células de raios (µm)	Altura dos raios (µm)	Número de pontuações no campo de cruzamento
<i>Wollemia nobilis</i>	A	13,21	14,17	1-4	40,87	2-8
	B	13,20	10 – 30	1 - 4	46,00	2-8

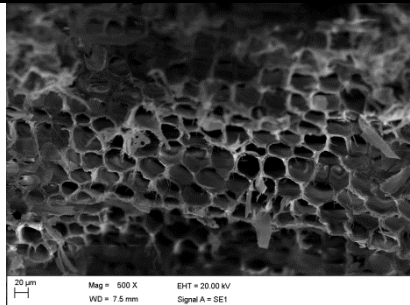
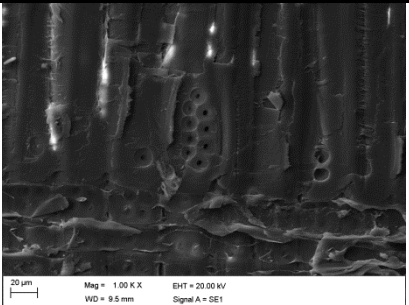
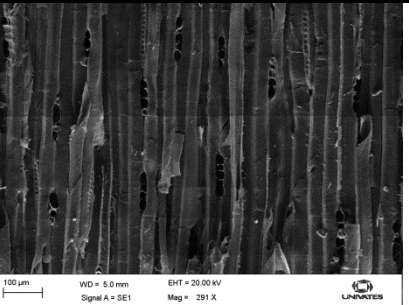
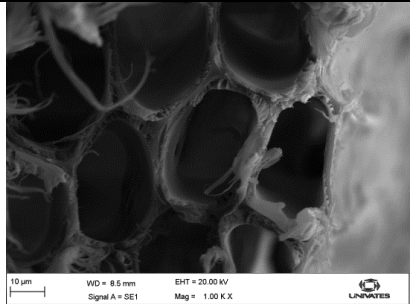
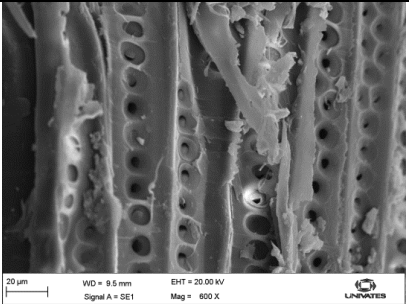
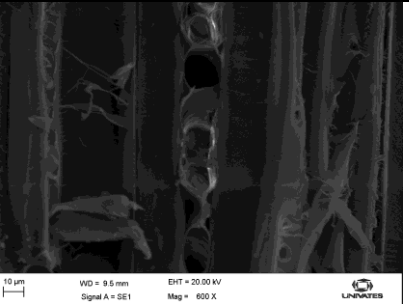
Fonte: Da autora.

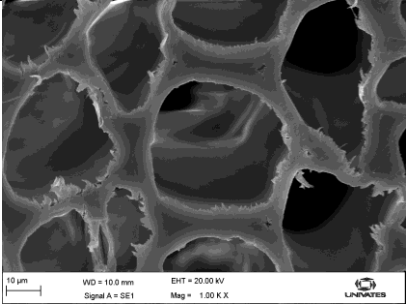
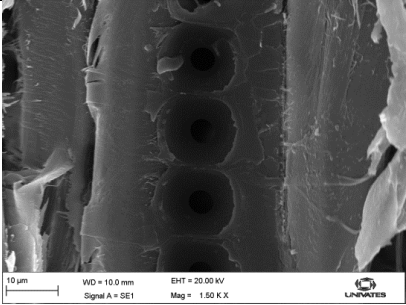
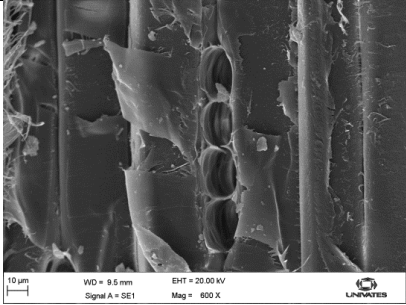
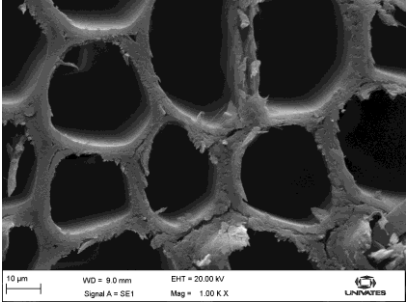
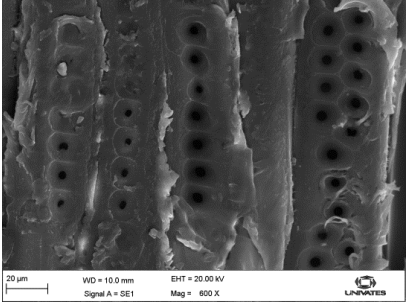
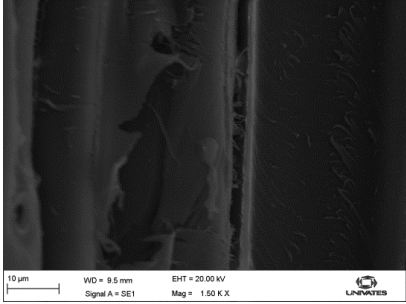
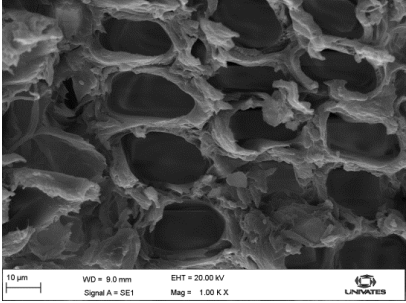
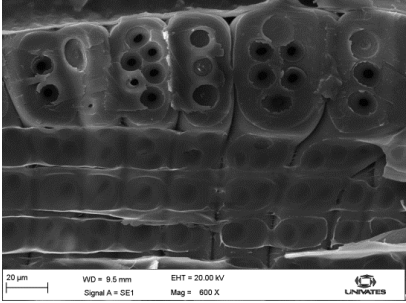
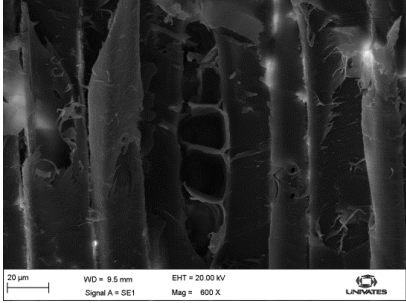
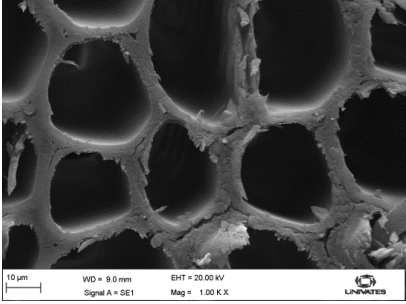
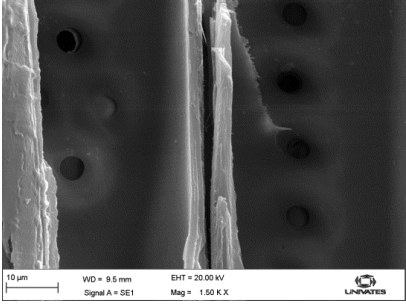
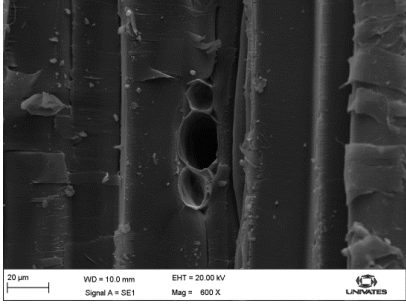
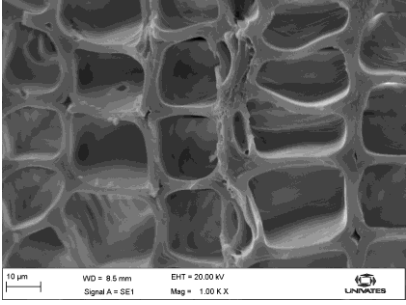
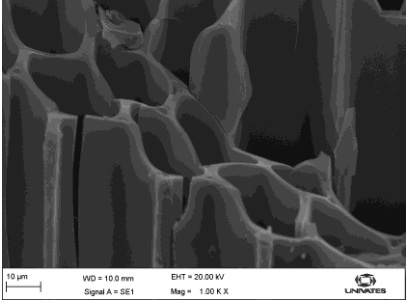
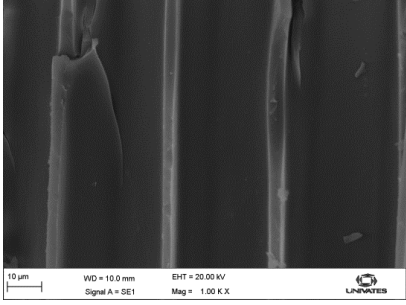
#### 4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

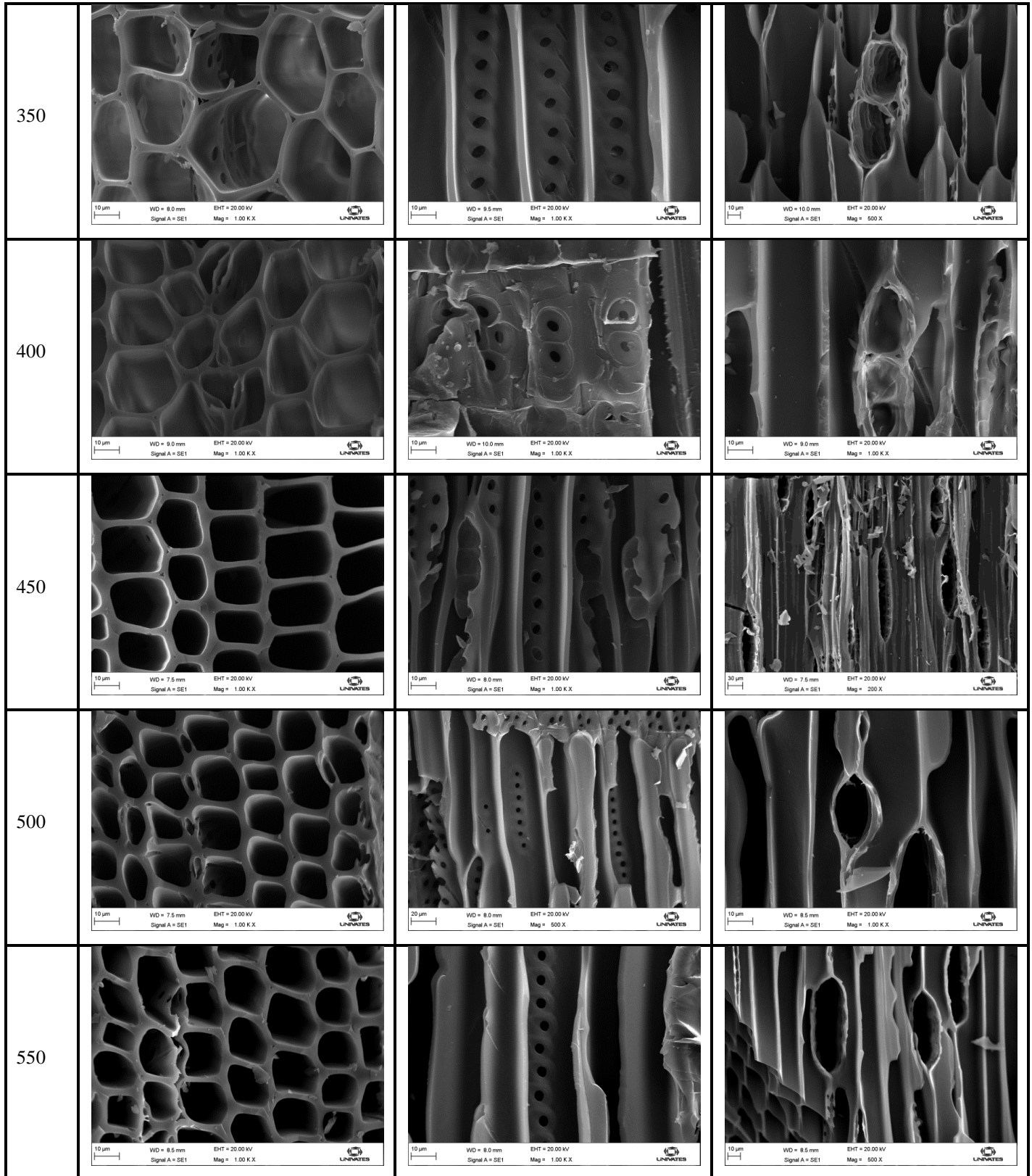
Através das imagens de MEV foi possível observar a homogeneização da parede celular, que é um dos aspectos utilizados para a identificação do carvão vegetal fóssil (Scott, 2000), ocorrida aos 300°C em *Araucaria angustifolia* (Tabela 3), *Araucaria bidwillii* (Tabela 4) e *Araucaria columnaris* (Tabela 5). Para *Wollemia nobilis* a homogeneização da parede celular foi observada aos 400°C (Figura 34), temperatura escolhida para a carbonização, pois se sabe que nesta temperatura já se obtêm carvão vegetal (Osterkamp et al, *submitted*).

Os dados anatômicos obtidos em imagens de MEV nos três planos de corte das espécies deste estudo estão apresentados nas tabelas 3, 4 e 5, e na Figura 36, onde é possível verificar que as estruturas anatômicas permanecem preservadas mesmo após a carbonização em altas temperaturas, apenas os raios que se expandiram e romperam em temperaturas elevadas.

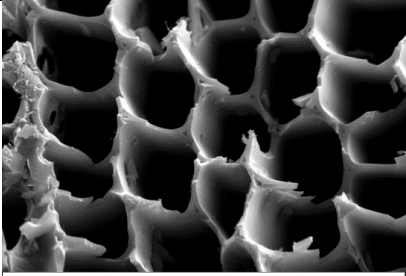
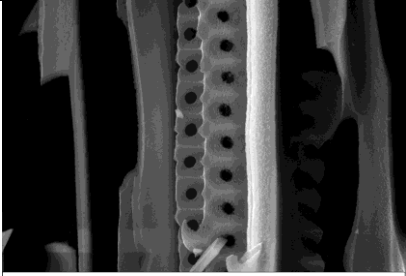
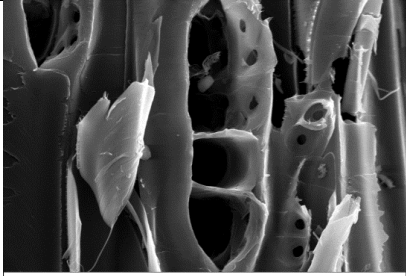
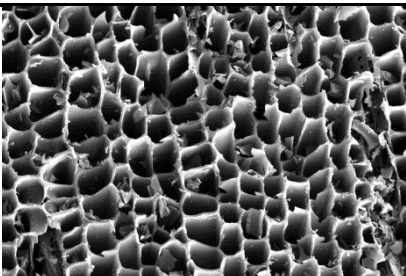
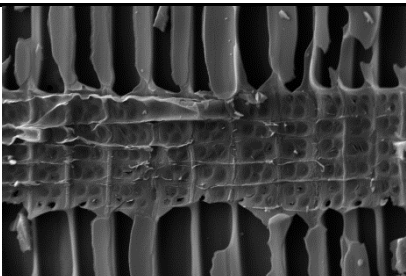
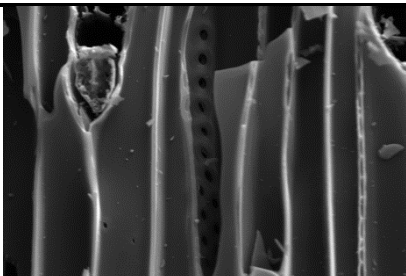
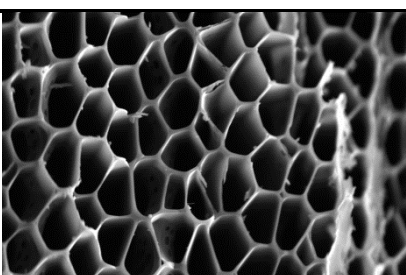
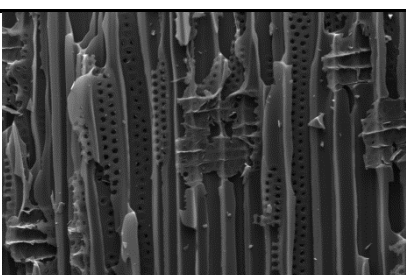
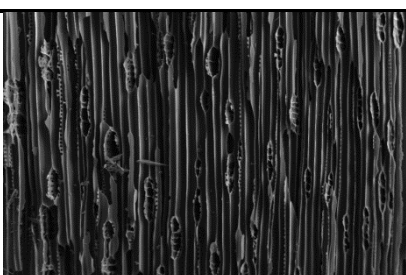
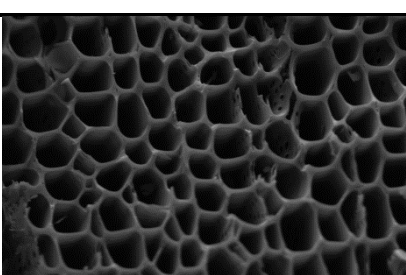
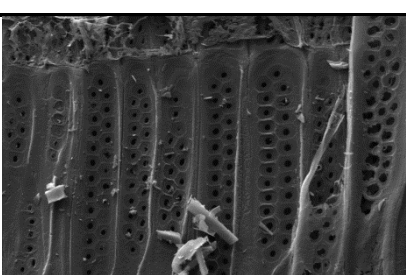
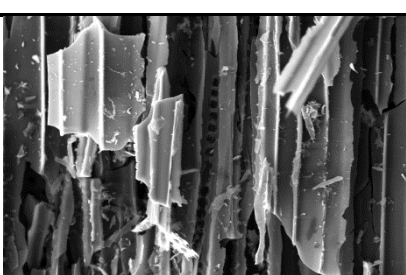
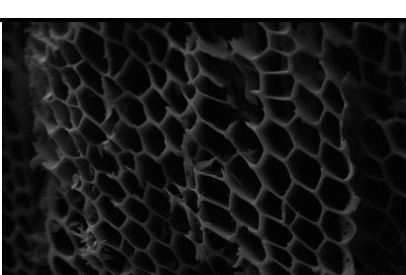
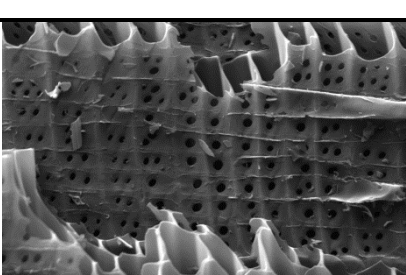
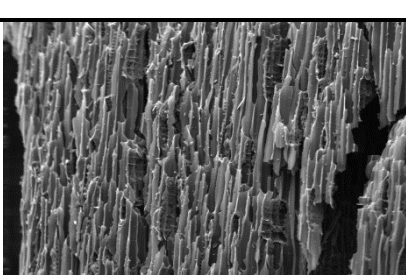



Tabela 03 – Fotomicrografias de *Araucaria angustifolia* nos três planos de corte em temperaturas de 50°C a 900°C.

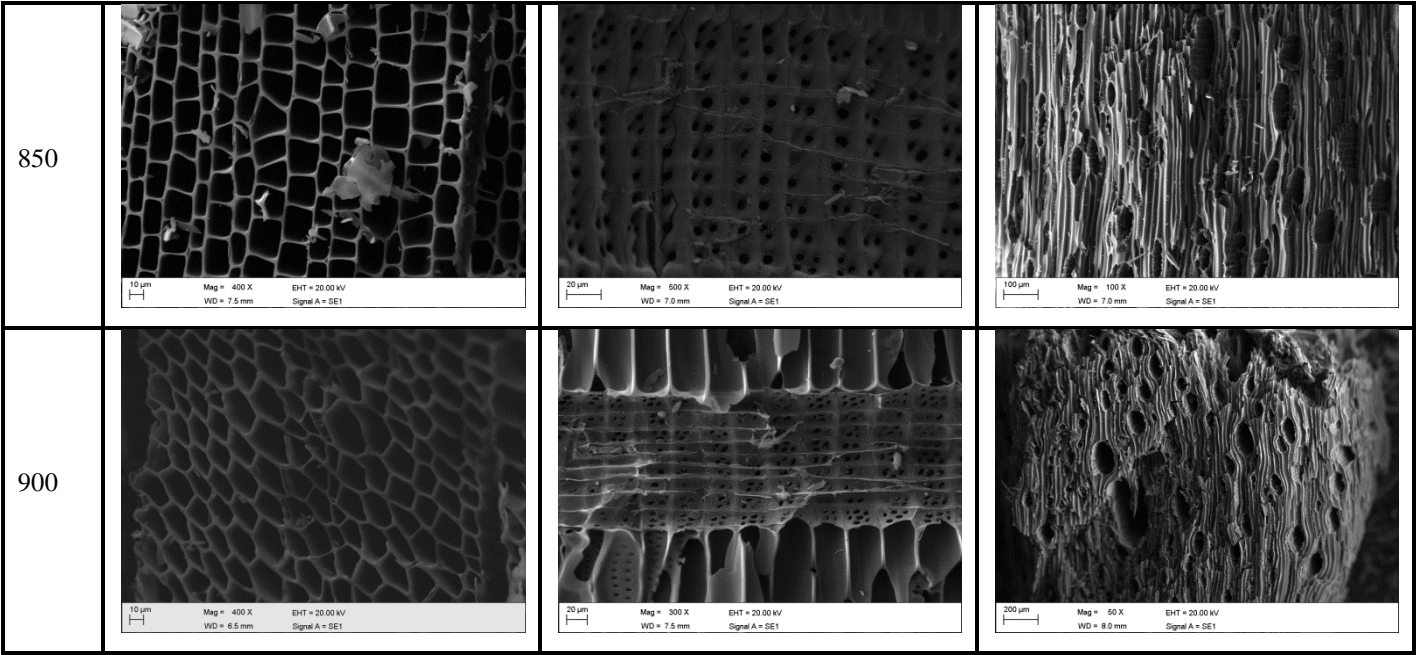
°C	Corte Transversal	Corte Radial	Corte Tangencial
<i>in natura</i>			
50			

100	 <p>10 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.50 K X</p>	 <p>10 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 600 X</p>
150	 <p>10 µm WD = 9.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>20 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 600 X</p>	 <p>10 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.50 K X</p>
200	 <p>10 µm WD = 9.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>20 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 600 X</p>	 <p>20 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 600 X</p>
250	 <p>10 µm WD = 9.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.50 K X</p>	 <p>20 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 600 X</p>
300	 <p>10 µm WD = 9.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 µm WD = 10.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>



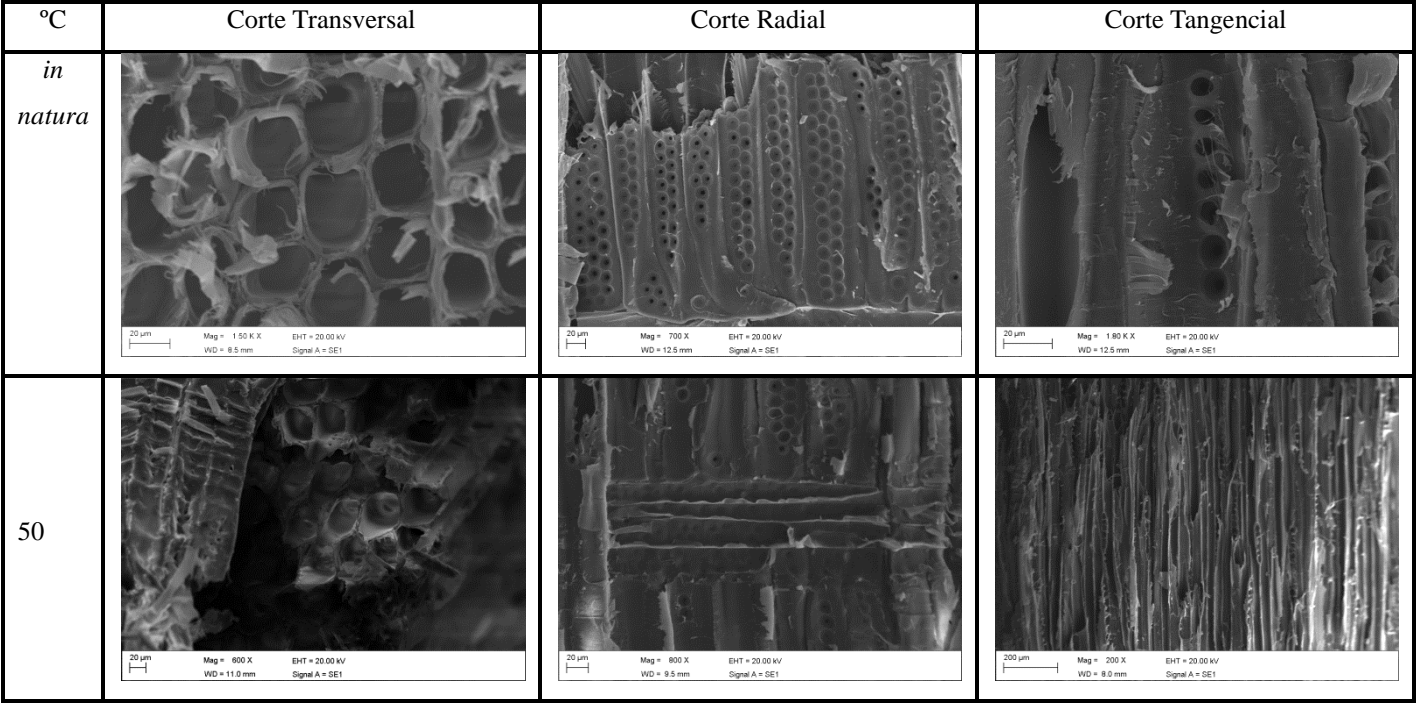


600	 <p>10 <math>\mu</math>m WD = 5.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 <math>\mu</math>m WD = 9.0 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>	 <p>10 <math>\mu</math>m WD = 6.5 mm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Mag = 1.00 K X</p>
	 <p>20 <math>\mu</math>m Mag = 800 X EHT = 20.00 kV WD = 11.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 8.0 mm Signal A = SE1</p>	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 700 X EHT = 20.00 kV WD = 9.0 mm Signal A = SE1</p>
	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 7.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>20 <math>\mu</math>m Mag = 200 X EHT = 20.00 kV WD = 7.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>100 <math>\mu</math>m Mag = 100 X EHT = 20.00 kV WD = 7.0 mm Signal A = SE1</p>
750	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 7.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>20 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 7.0 mm Signal A = SE1</p>	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 900 X EHT = 20.00 kV WD = 12.0 mm Signal A = SE1</p>
	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 6.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>20 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>100 <math>\mu</math>m Mag = 100 X EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>
800	 <p>10 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 6.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>20 <math>\mu</math>m Mag = 400 X EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	 <p>100 <math>\mu</math>m Mag = 100 X EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>

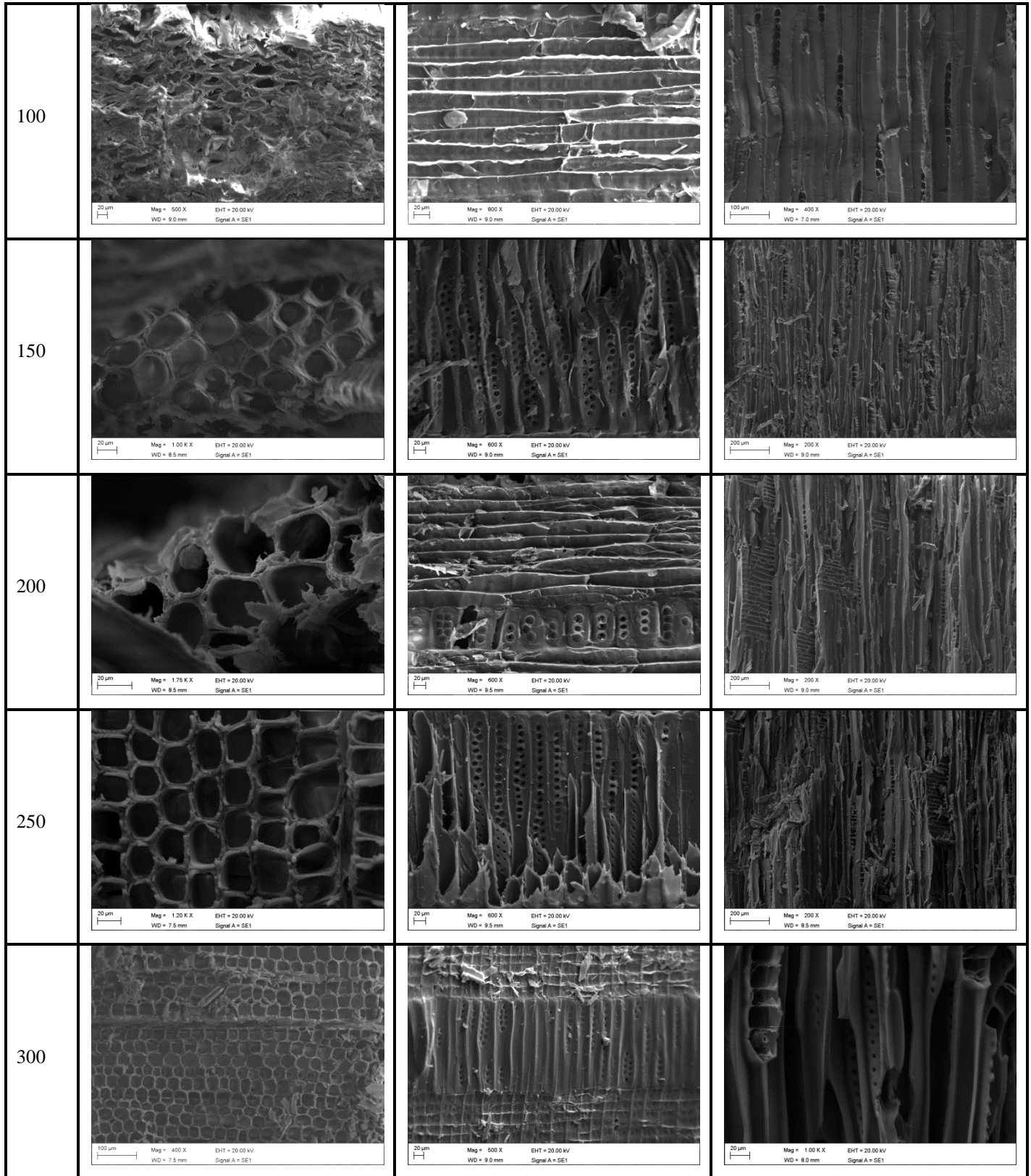


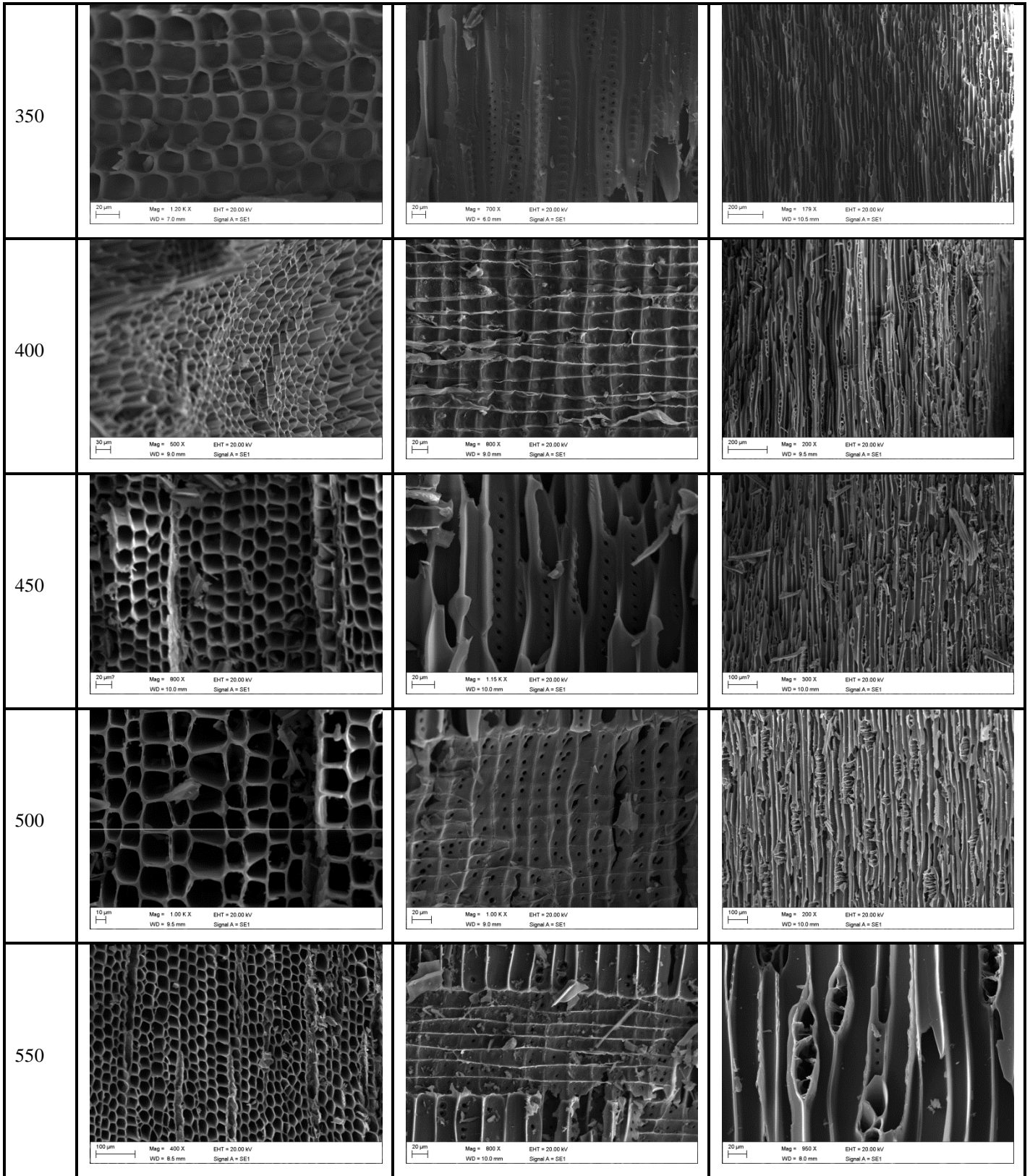
Fonte: Da autora.

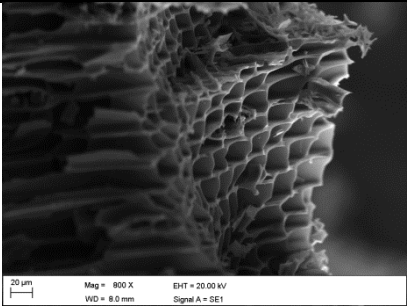
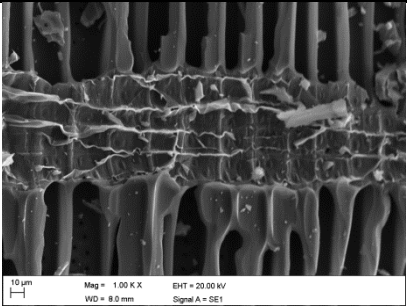
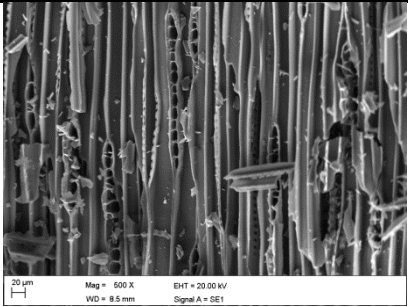
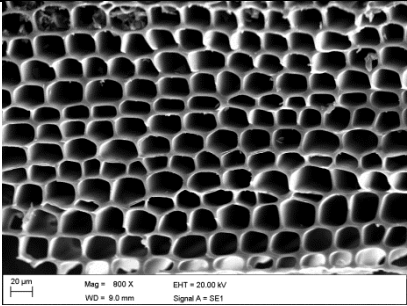
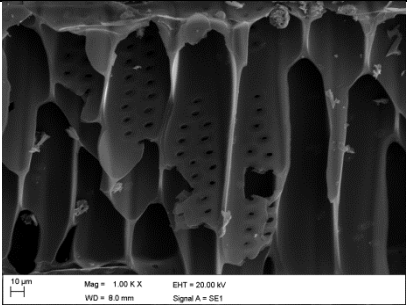
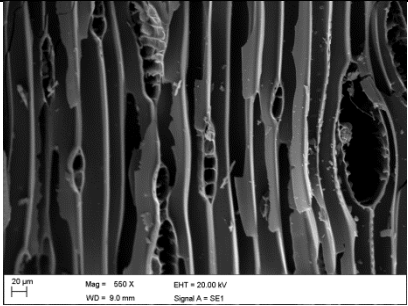
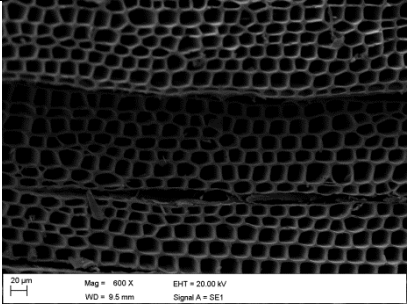
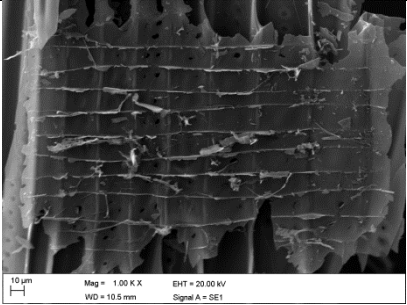
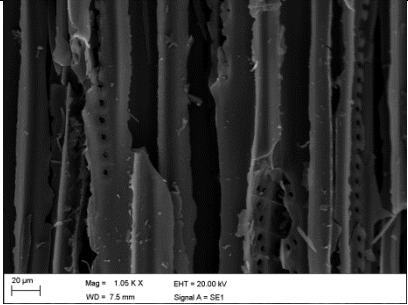
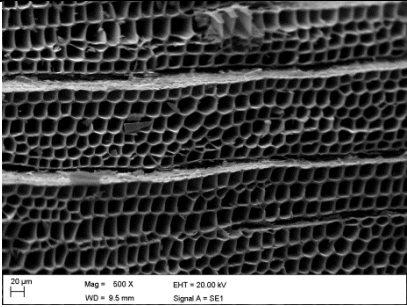
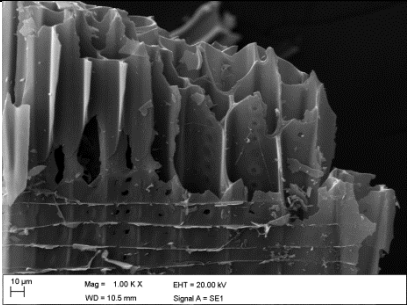
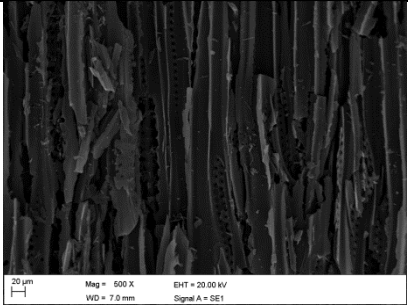
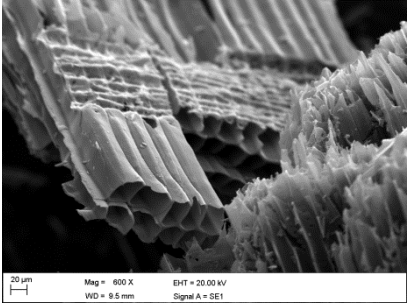
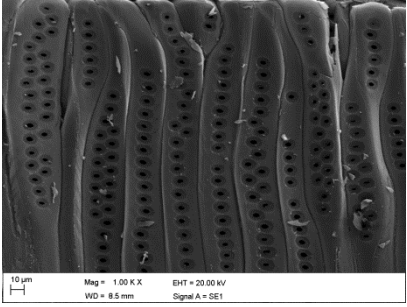
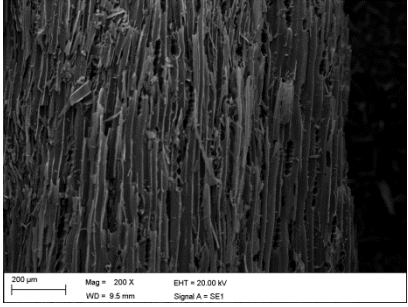
Tabela 04 – Fotomicrografias de *Araucaria bidwillii* nos três planos de corte OU sentidos estruturais do lenho em temperaturas de 50°C a 800°C.







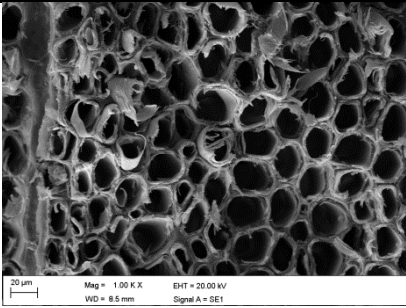
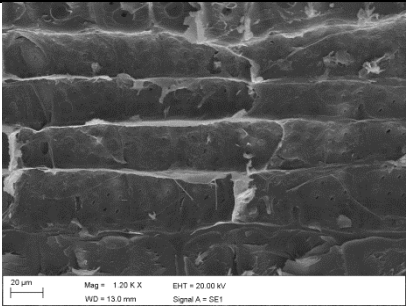
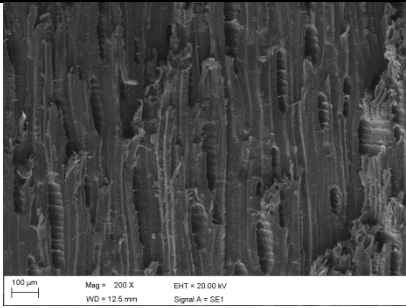
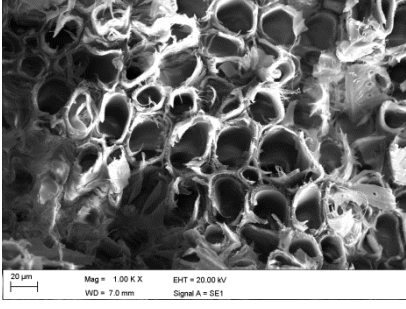
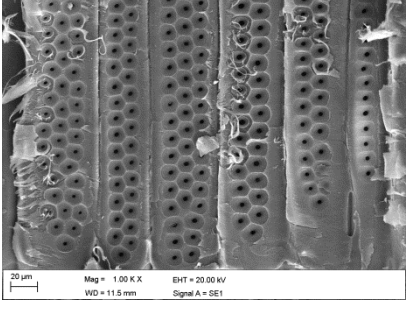
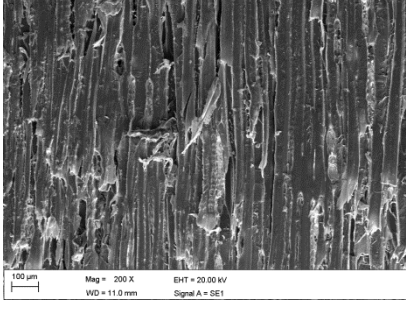
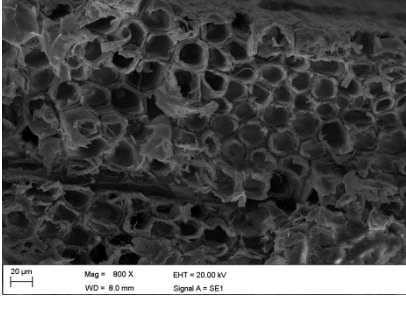
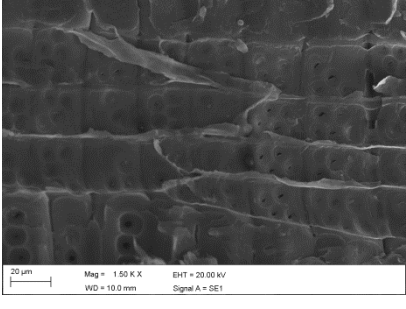
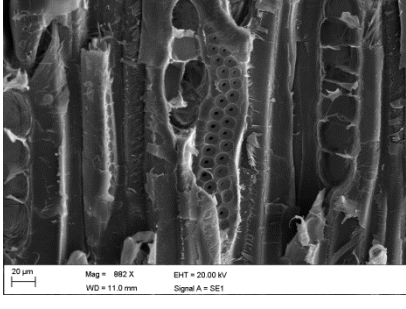
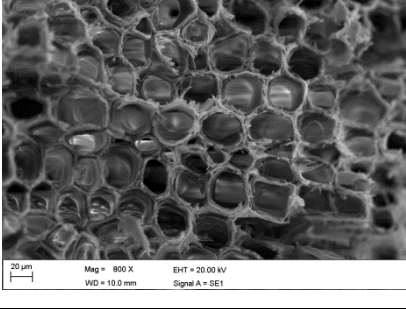
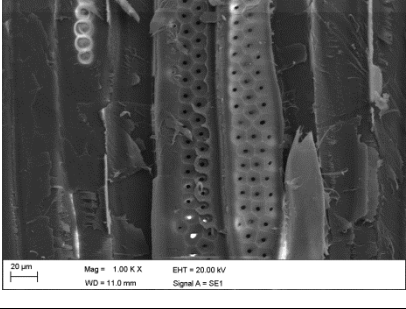
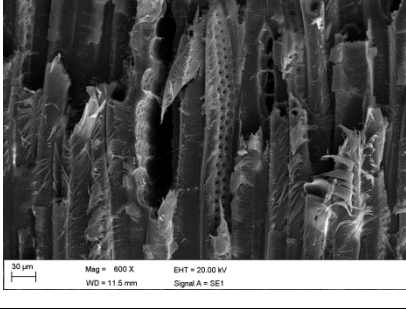
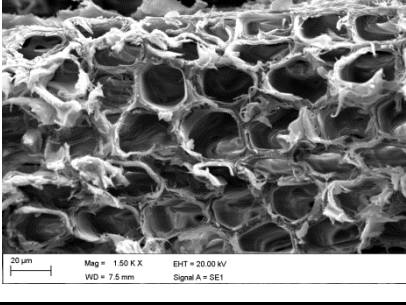
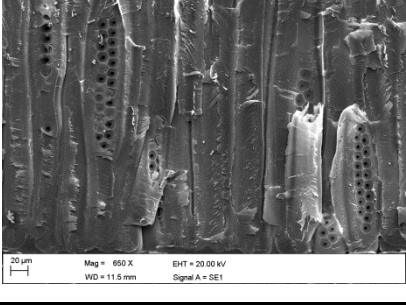
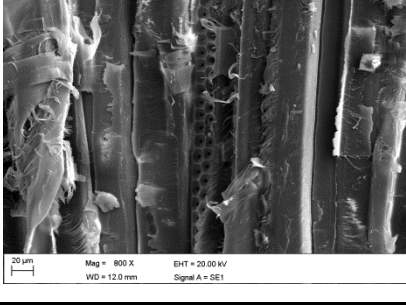


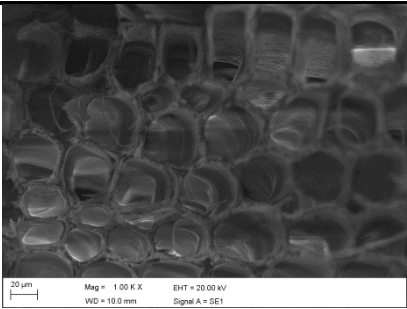
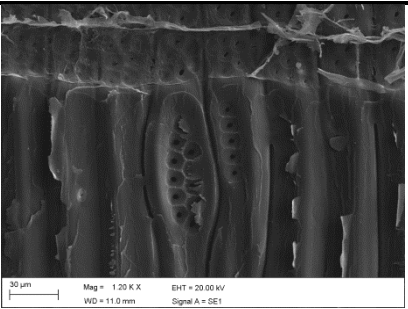
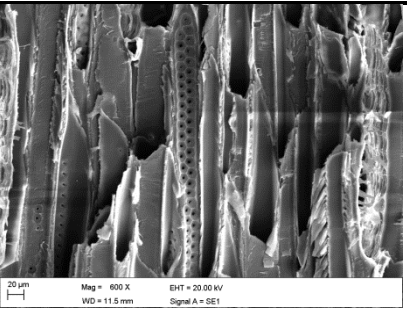
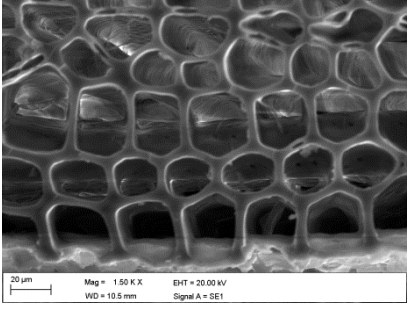
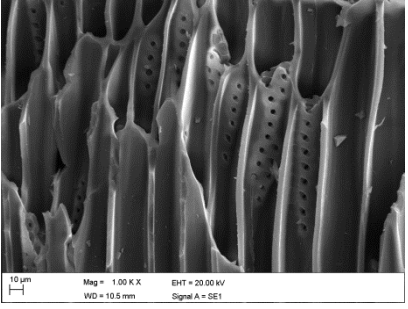
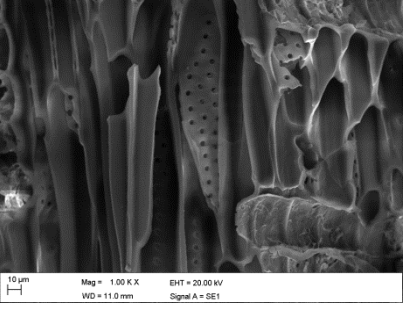
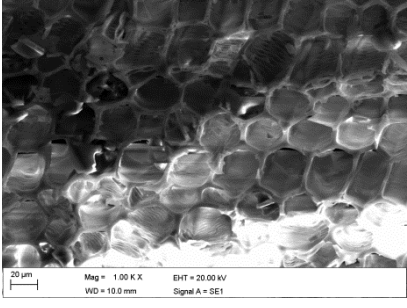
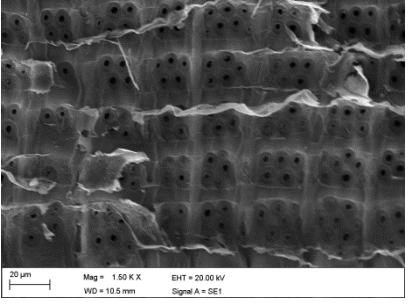
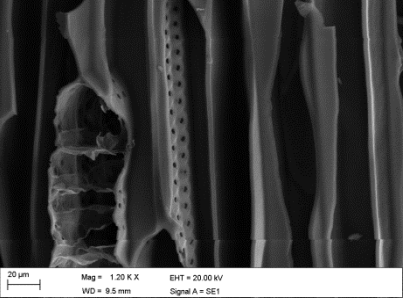
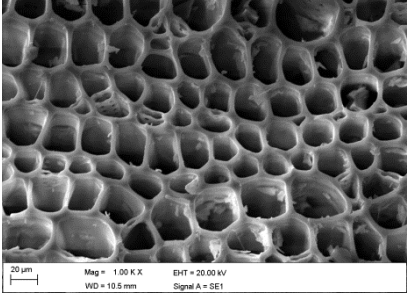
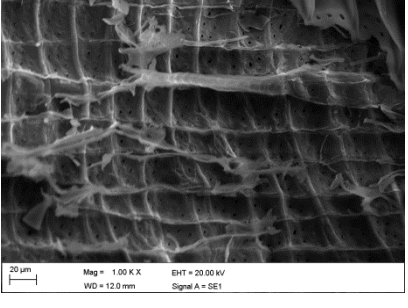
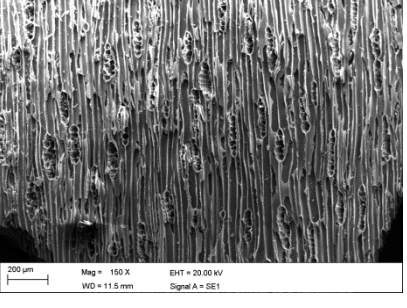
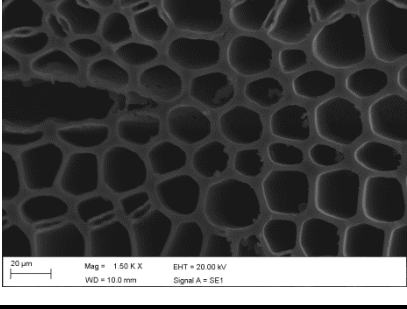
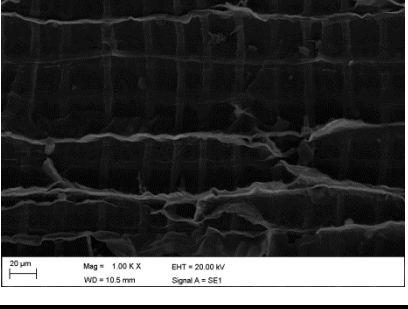
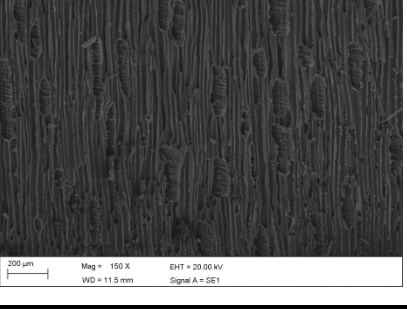
600	 <p>20 µm    Mag = 800 X    EHT = 20.00 kV WD = 8.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1.00 K X    EHT = 20.00 kV WD = 8.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 600 X    EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm    Signal A = SE1</p>
650	 <p>20 µm    Mag = 800 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1.00 K X    EHT = 20.00 kV WD = 9.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 550 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.0 mm    Signal A = SE1</p>
700	 <p>20 µm    Mag = 600 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1.00 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 1.05 K X    EHT = 20.00 kV WD = 7.5 mm    Signal A = SE1</p>
750	 <p>20 µm    Mag = 500 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1.00 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 500 X    EHT = 20.00 kV WD = 7.0 mm    Signal A = SE1</p>
800	 <p>20 µm    Mag = 600 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1.00 K X    EHT = 20.00 kV WD = 8.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>200 µm    Mag = 200 X    EHT = 20.00 kV WD = 9.5 mm    Signal A = SE1</p>

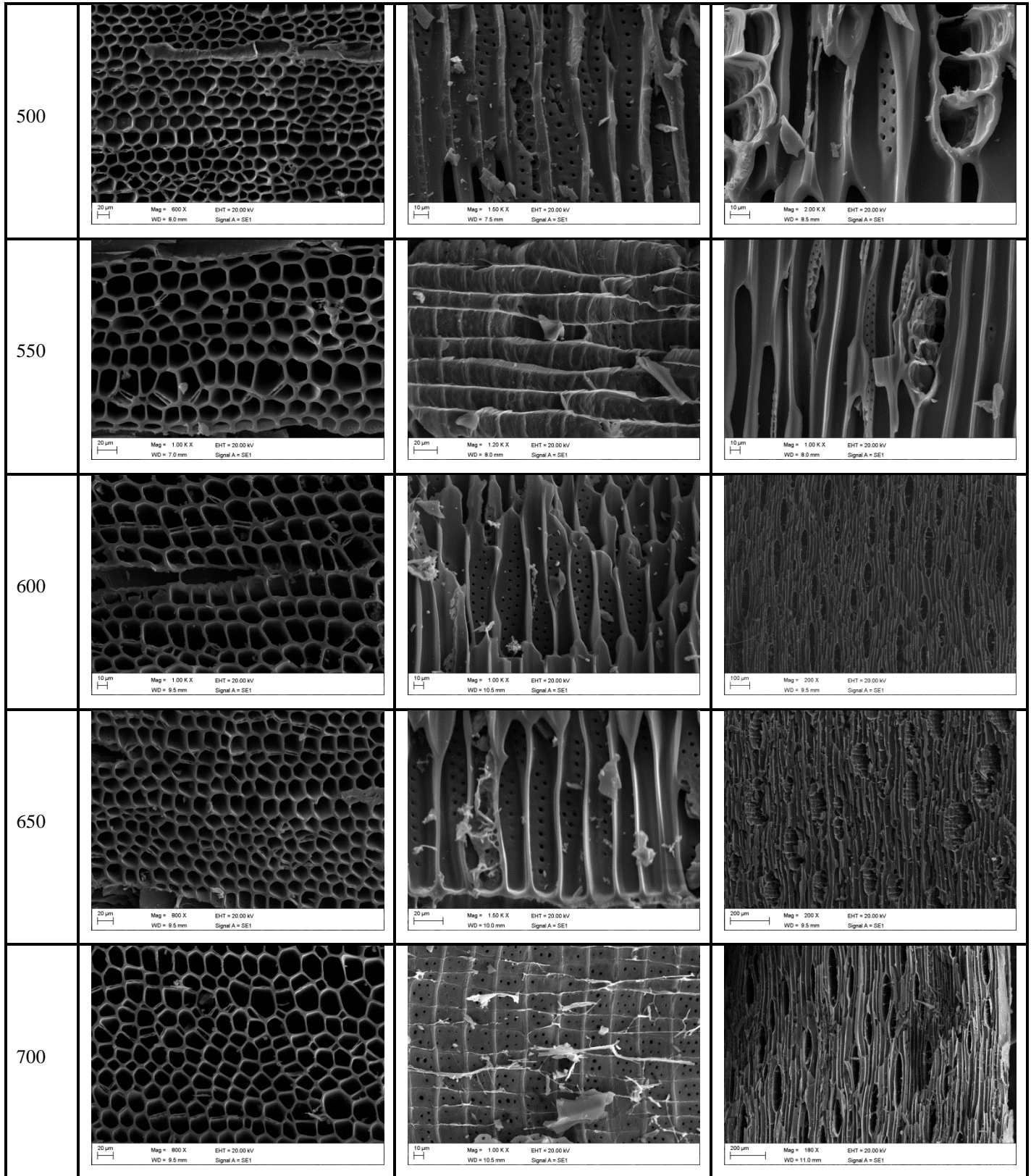
Fonte: Da autora.



Tabela 05 – Fotomicrografias de *Araucaria columnaris* nos três planos de corte temperaturas de 50°C a 800°C.

°C	Corte Transversal	Corte Radial	Corte Tangencial
<i>in natura</i>			
50			
100			
150			
200			

250	 <p>20 µm    Mag = 100 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>30 µm    Mag = 120 K X    EHT = 20.00 kV WD = 11.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 600 X    EHT = 20.00 kV WD = 11.5 mm    Signal A = SE1</p>
300	 <p>20 µm    Mag = 150 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1000 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>10 µm    Mag = 1000 K X    EHT = 20.00 kV WD = 11.0 mm    Signal A = SE1</p>
350	 <p>20 µm    Mag = 100 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 150 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 120 K X    EHT = 20.00 kV WD = 9.5 mm    Signal A = SE1</p>
400	 <p>20 µm    Mag = 100 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 100 K X    EHT = 20.00 kV WD = 12.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>200 µm    Mag = 150 X    EHT = 20.00 kV WD = 11.5 mm    Signal A = SE1</p>
450	 <p>20 µm    Mag = 150 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.0 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>20 µm    Mag = 100 K X    EHT = 20.00 kV WD = 10.5 mm    Signal A = SE1</p>	 <p>200 µm    Mag = 150 X    EHT = 20.00 kV WD = 11.5 mm    Signal A = SE1</p>



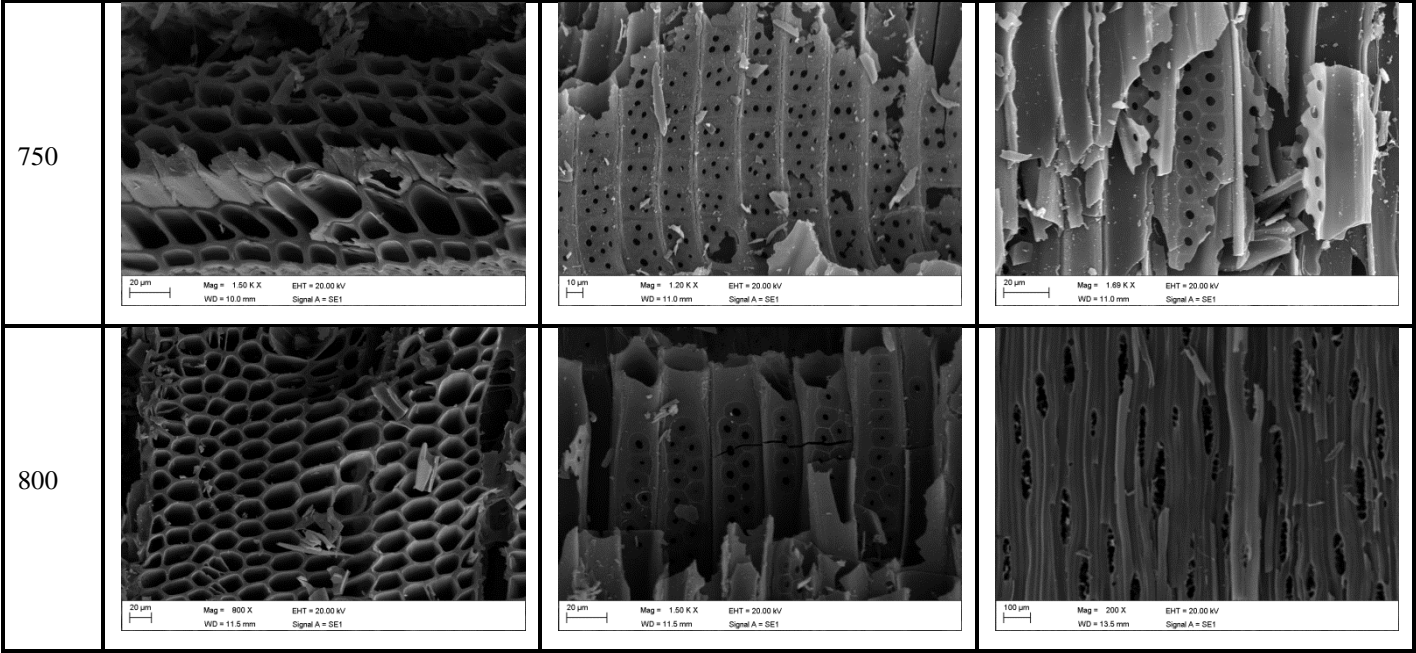
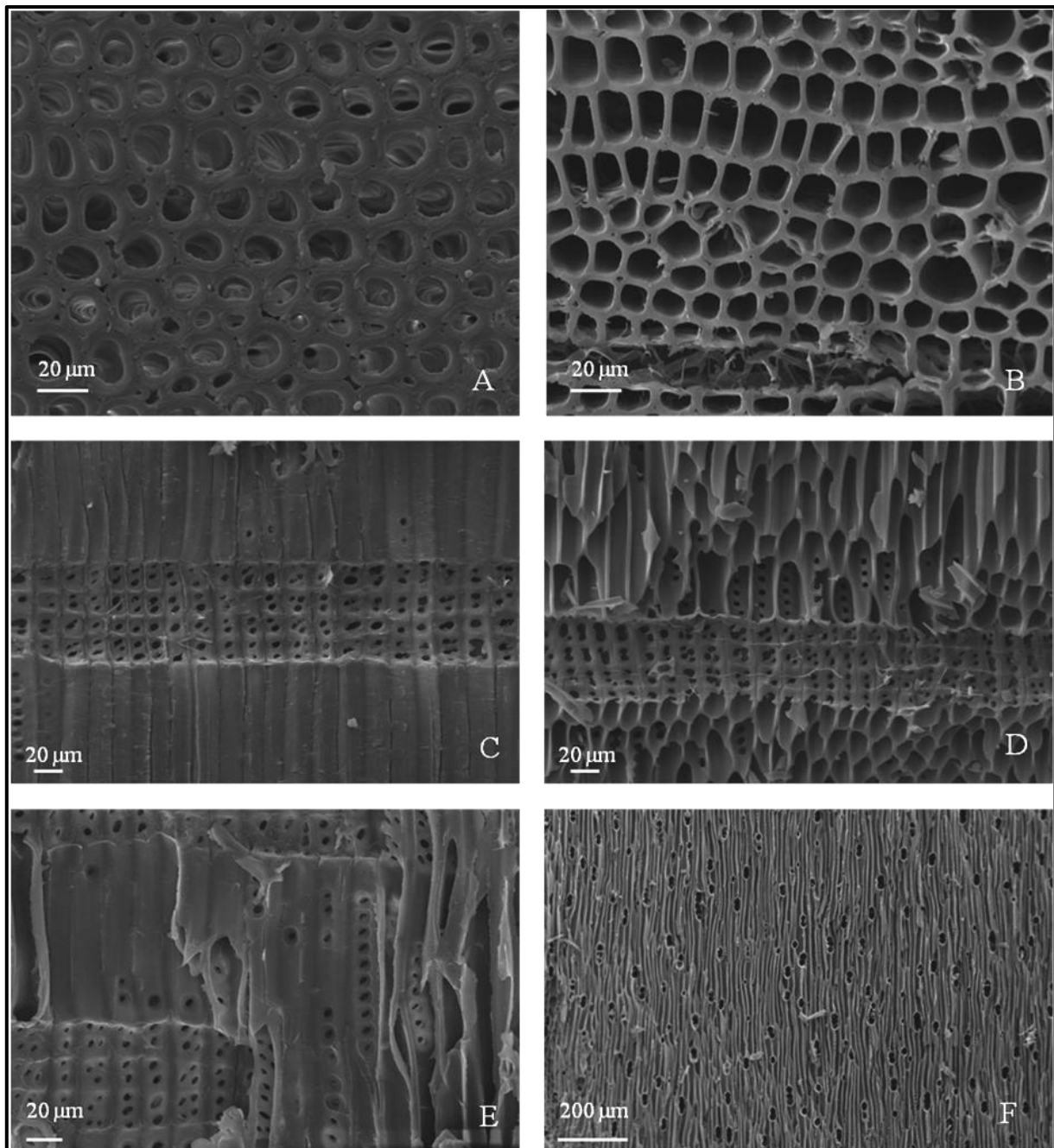




Figura 34 - A – Lenho de *Wollemia nobilis*, em plano de corte transversal, espaços intercelulares entre os traqueídes e parede celular não homogeneizada. B – *Wollemia nobilis* carbonizada à 400°C em corte transversal, observando-se a homogeneização das paredes celulares. C – *Wollemia nobilis in natura* em corte radial, mostrando os campos de cruzamento, com 2 a 4 pontoações em cada campo. D – Campo de cruzamento de *Wollemia nobilis* em corte radial, carbonizada à 400°C, mostrando a manutenção dos campos, com 2-4 pontoações por campo e paredes celulares homogeneizadas entre os traqueídes. E – Corte radial de amostra *in natura*, mostrando as pontoações areoladas uniseriadas nos traqueídes. F – *Wollemia nobilis* carbonizada a 400°C em corte tangencial com raios contendo de 1 a 4 células de altura.





## 4.6 Análise Estatística

### 4.6.1 Teste aplicado em *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwillii* e *Araucaria columnaris*

Os resultados da análise estatística são apresentados em gráficos referentes a cada espécie e de cada caracter analisado.

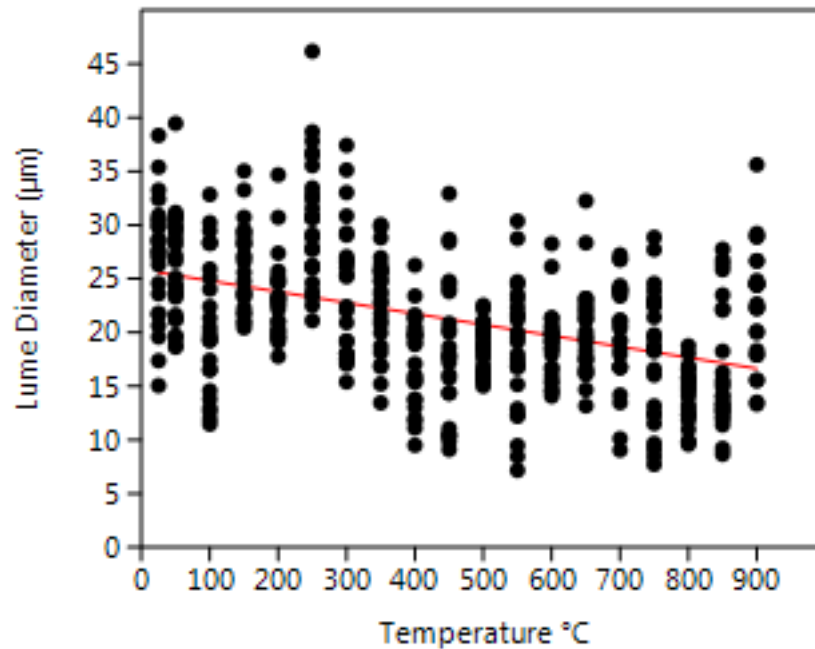
Para as medições de *Araucaria angustifolia* (Figuras 35, 36, 37, 38, 39, 40 e, 41), os valores de p (Tabela 6) indicam que a temperatura tem uma influência estatisticamente significativa nas variáveis. Todas as medidas para esta espécie têm uma correlação positiva com r, exceto a largura dos raios. À medida que a temperatura de carbonização aumenta, há a redução do caracter anatômico, o oposto ocorre com a largura dos raios, onde o aumento do caracter apresenta correlação positiva com a temperatura.

Tabela 6 – Análise da Regressão Linear Bivariada de *Araucaria angustifolia* em 7 caracteres anatômicos medidos em diferentes temperaturas, com valores de r, p, r<sup>2</sup> e %r<sup>2</sup>.

<i>Araucaria angustifolia</i>								
Variável	Coefficiente angular	Erro	Coefficiente linear	Erro2	r	p	r <sup>2</sup>	%r <sup>2</sup>
Diâmetro do lumen	-0.01022	0.00097	25.836	0.51017	-0.437	1.62E-23	0.191	19.053
Diâmetro dos traqueídes em corte tangencial	-0.00967	0.0011	28.044	0.58152	-0.374	3.50E-17	0.140	13.958
Diâmetro das pontoações em campo de cruzamento	-0.00267	0.0004	9.7093	0.21226	-0.292	8.78E-11	0.085	8.520
Diâmetro das pontoações em corte tangencial	-0.00373	0.00047	11.779	0.24765	-0.342	1.63E-14	0.117	11.727
Diâmetro das pontoações em corte radial	-0.00371	0.00038	13.244	0.19853	-0.412	7.04E-21	0.170	16.968
Altura dos raios	-0.01601	0.00674	122.08	3.5521	-0.109	0.01796	0.012	1.178
Largura dos raios	0.00735	0.00094	15.621	0.49548	0.3382	3.59E-14	0.114	11.435

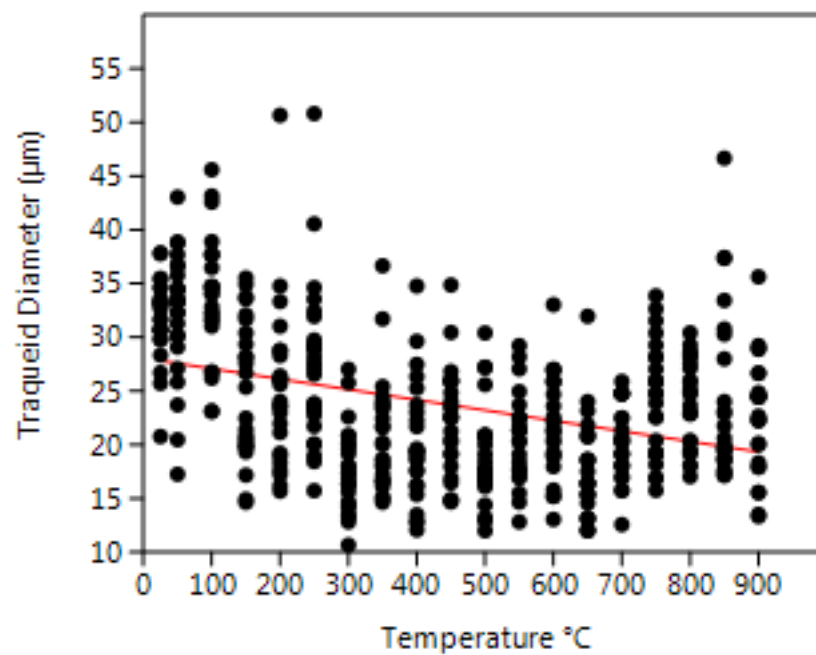
Fonte: Da autora.

Figura 35 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



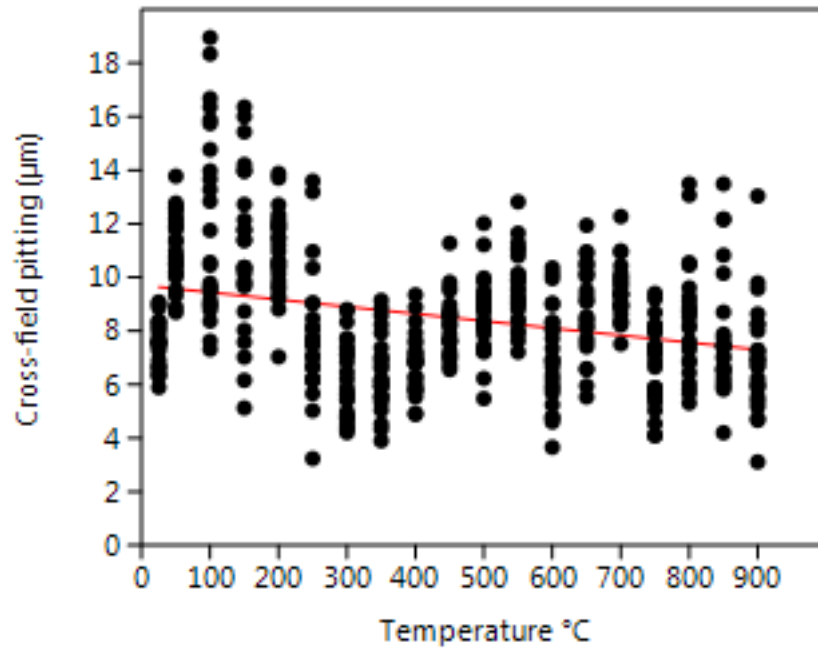
Fonte: Da autora

Figura 36 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do traqueídes de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



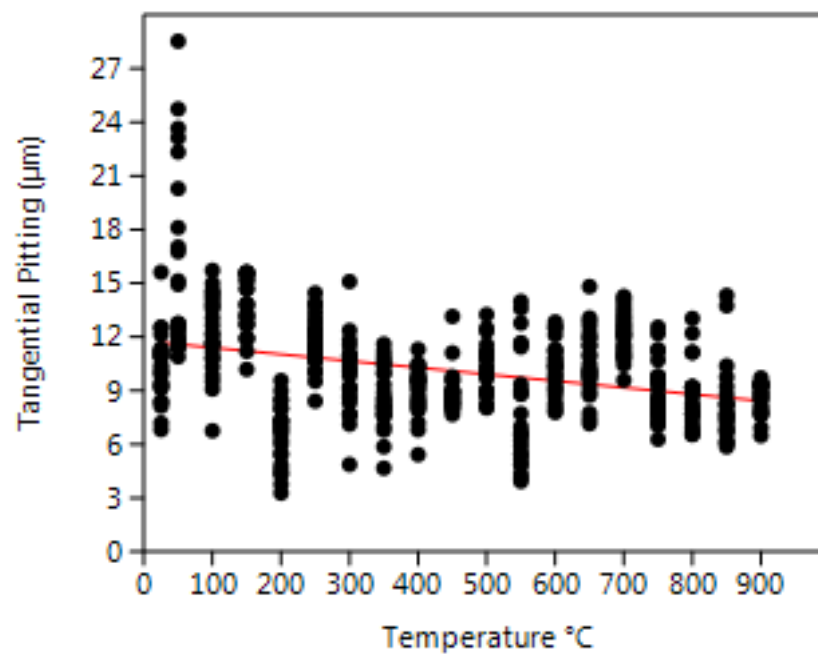
Fonte: Da autora

Figura 37 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no campo de cruzamento de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



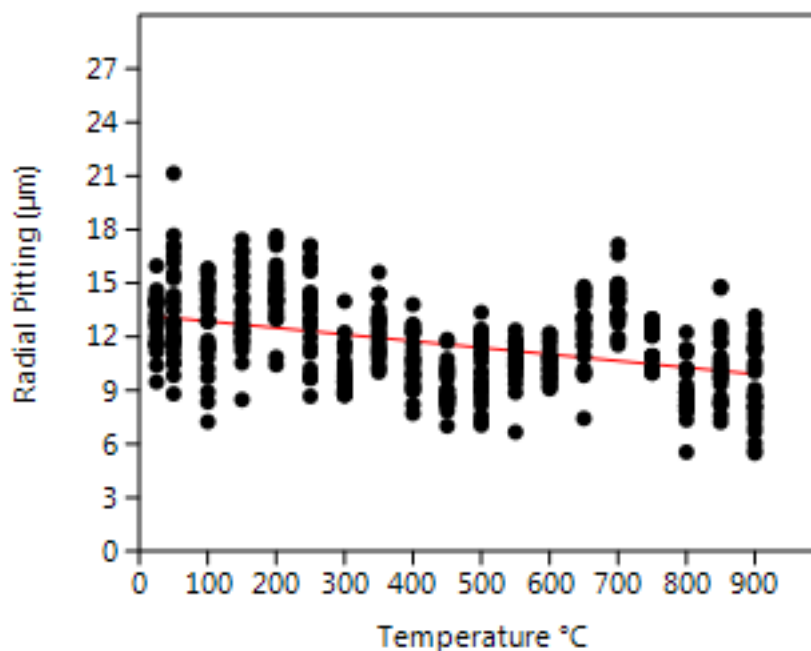
Fonte: Da autora

Figura 38 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte tangencial de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



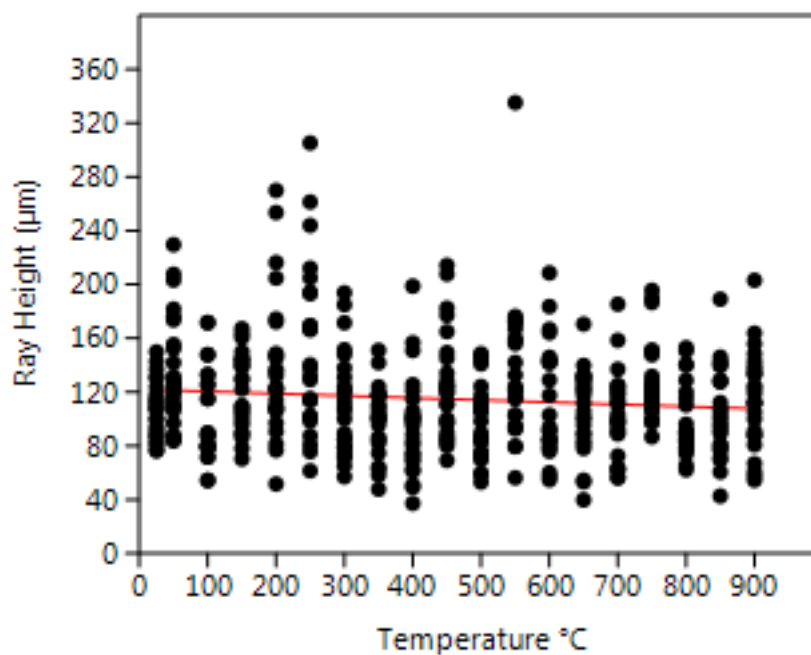
Fonte: Da autora

Figura 39 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte radial de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



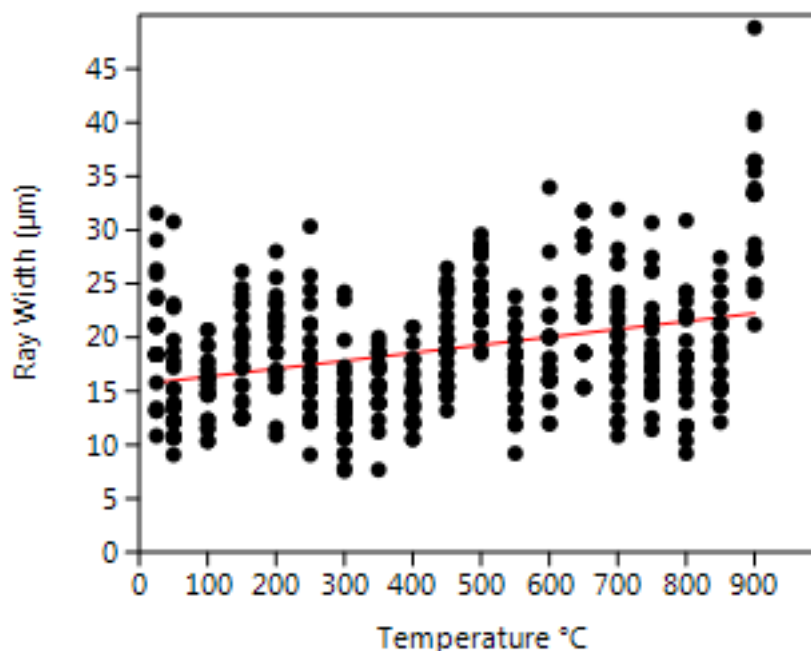
Fonte: Da autora

Figura 40 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

Figura 41 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da largura dos raios de *Araucaria angustifolia* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

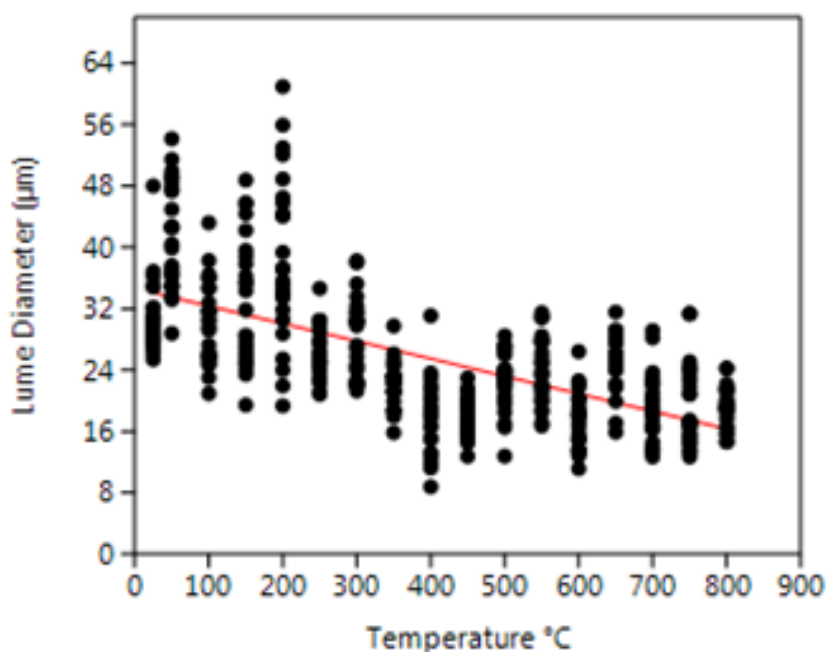
Para as medições de *Araucaria bidwilli* a análise da regressão linear bivariada apresenta os gráficos, Figuras 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48, e os valores de  $p$  (Tabela 7) são inferiores a 0,05 para todas as características medidas, indicando que a temperatura tem uma influência estatisticamente significativa nas variáveis, com exceção da largura dos raios, com  $p=0,70331$  e a correlação entre esta variável é positiva e não significativa. Para os demais caracteres as correlações são negativas.

Tabela 7 – Análise da Regressão Linear Bivariate de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas, com valores de  $r$ ,  $p$ ,  $r^2$  e  $\%r^2$ .

<i>Araucaria bidwillii</i>								
Variável	Coefficiente angular	Erro	Coefficiente linear	Erro2	$r$	$p$	$r^2$	$\%r^2$
Diâmetro do lumen	-0.02287	0.00137	34.640	0.64033	-0.6316	1.08E-48	0.399	39.889
Diâmetro dos traqueídes em corte tangencial	-0.01471	0.00137	35.803	0.64096	-0.4638	4.72E-24	0.215	21.508
Diâmetro das pontoações em campo de cruzamento	-0.00361	0.00036	9.197	0.16743	-0.4410	1.20E-21	0.194	19.445
Diâmetro das pontoações em corte tangencial	-0.00352	0.00044	10.025	0.20822	-0.3602	1.83E-14	0.130	12.974
Diâmetro das pontoações em corte radial	-0.00456	0.00051	12.686	0.23952	-0.3979	1.41E-17	0.158	15.836
Altura dos raios	-0.07860	0.01121	177.160	5.2573	-0.3228	9.27E-12	0.104	10.417
Largura dos raios	0.00058	0.00153	20.236	0.71799	0.0185	0.70331	0.000	0.034

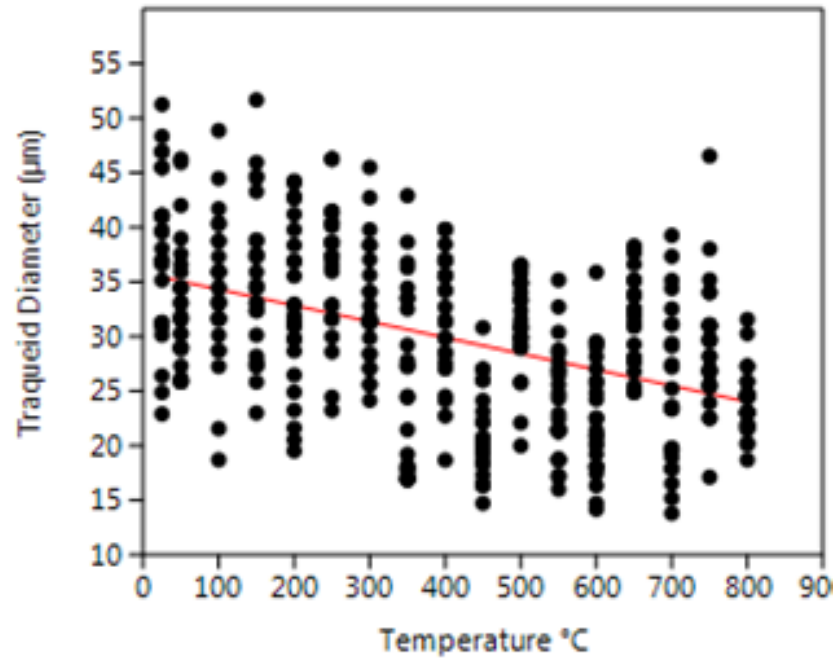
Fonte: Da autora

Figura 42 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



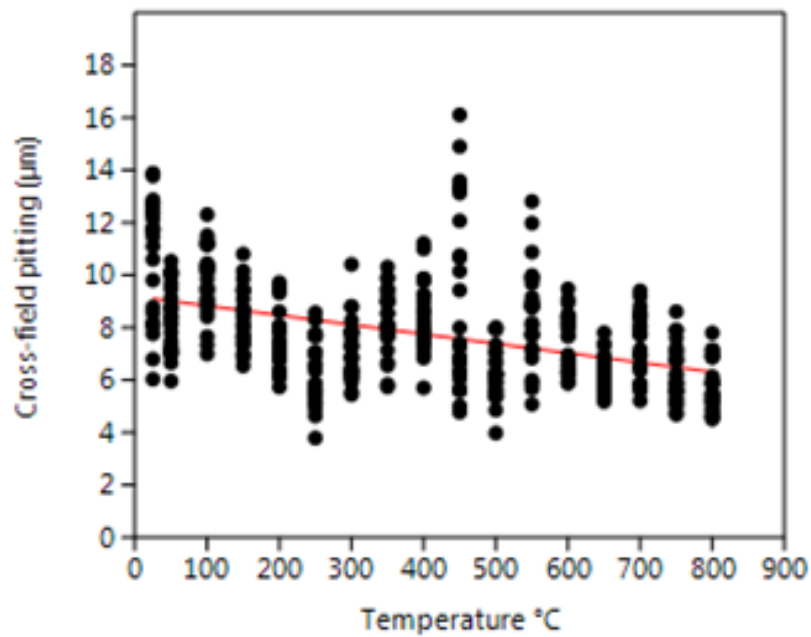
Fonte: Da autora

Figura 43 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro dos traqueídes de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



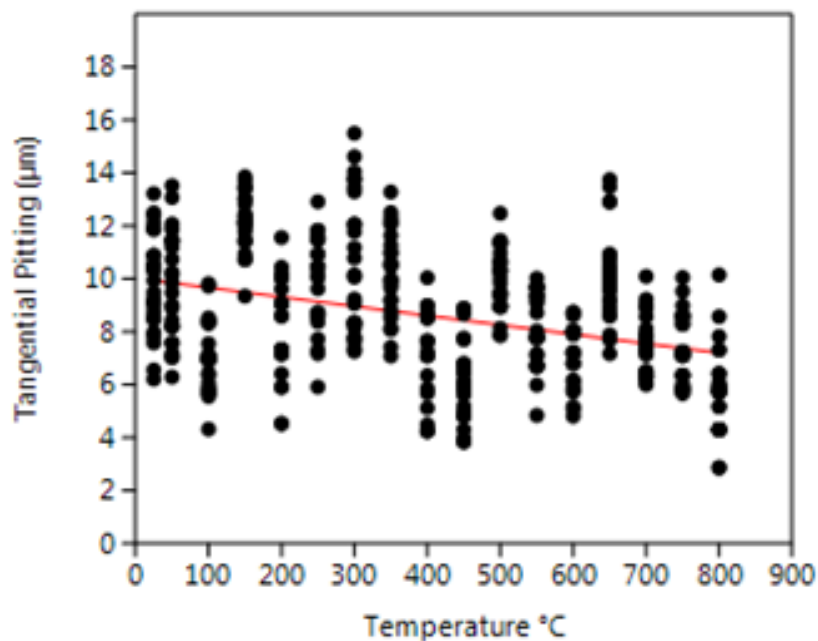
Fonte: Da autora

Figura 44 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



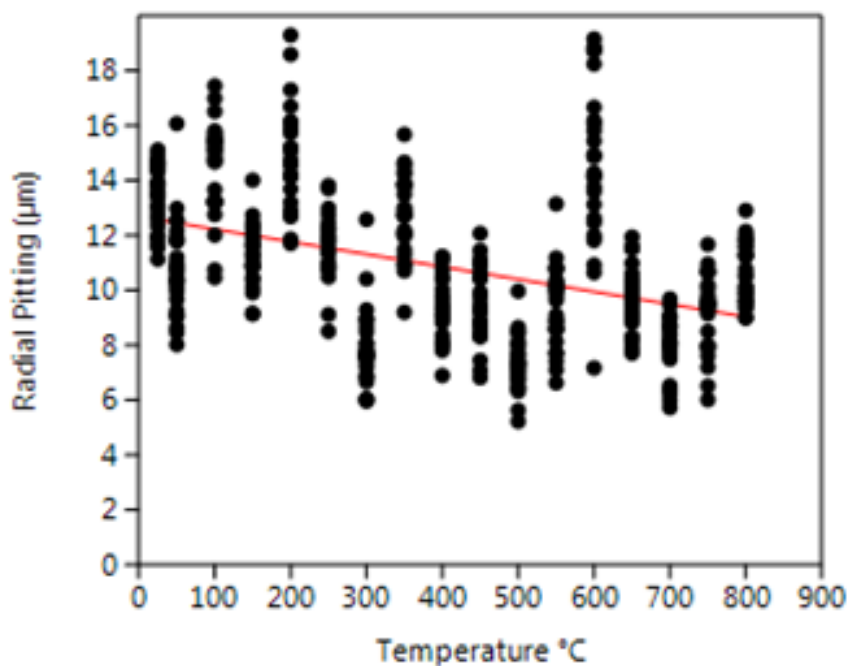
Fonte: Da autora

Figura 45 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte tangencial de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

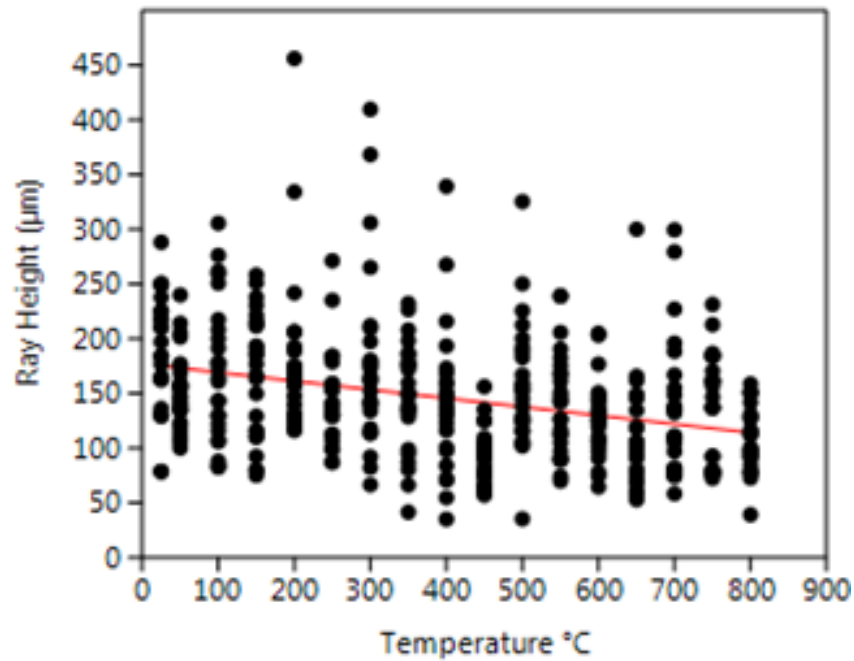
Figura 46 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações em corte radial de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

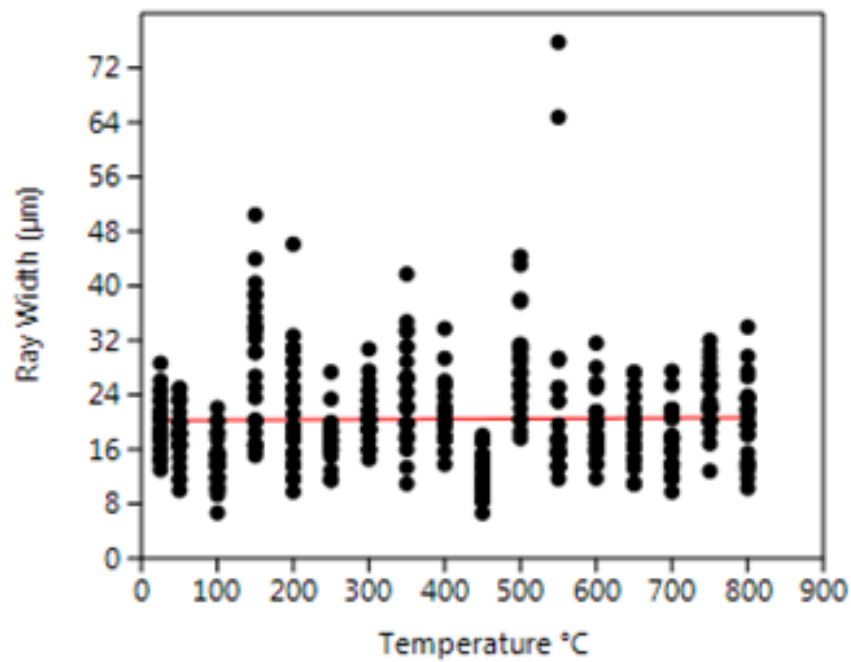


Figura 47 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

Figura 48 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da largura dos raios de *Araucaria bidwillii* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

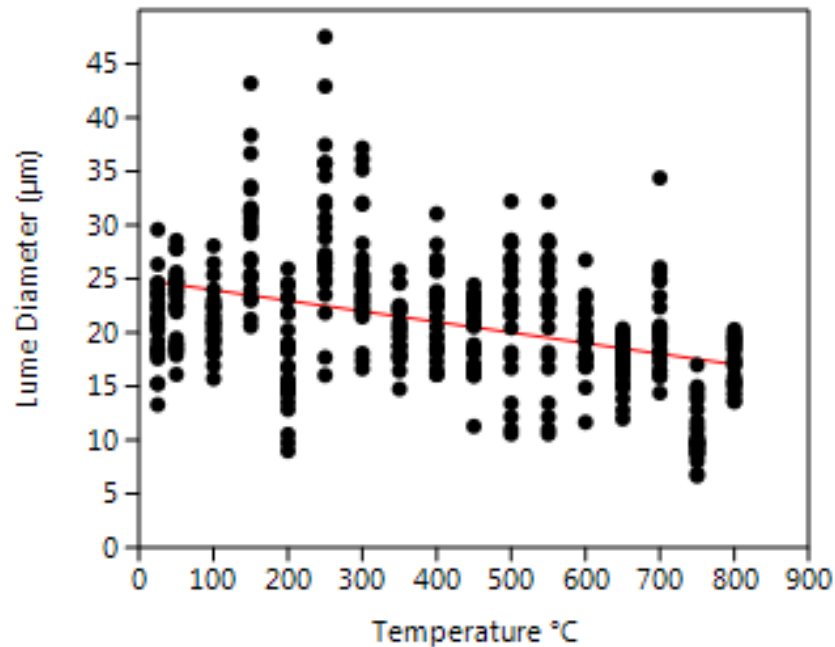
Para *Araucaria columnaris* os gráficos, Figuras 49, 50, 51, 52, 53, 54 e 55, expressam as medições para esta espécie em diferentes caracteres anatômicos em diferentes tratamentos térmicos, e os valores de p (Tabela 8) são inferiores a 0,05 para todas as características medidas, indicando que a temperatura tem uma influência estatisticamente significativa nas variáveis, com exceção da altura dos raios com  $p=0,816$ , onde a correlação é positiva e não significativa.

Tabela 8 – Análise da Regressão Linear Bivariate de *Araucaria columnaris* em 7 caracteres anatômicos medidos em diferentes temperaturas, com valores de r, p,  $r^2$  e  $\%r^2$ .

<i>Araucaria columnaris</i>								
Variável	Coefficiente angular	Erro	Coefficiente linear	Erro2	r	p	$r^2$	$\%r^2$
Diâmetro do lumen	-0.00990	0.00111	24.969	0.5187	-0.399	1.08E-17	0.159	15.939
Diâmetro dos traqueídes em corte tangencial	-0.01704	0.00241	35.877	1.15	-0.32	1.38E-11	0.103	10.253
Diâmetro das pontoações em campo de cruzamento	-0.00261	0.00031	8.329	0.1501	-0.369	3.97E-15	0.136	13.590
Diâmetro das pontoações em corte tangencial	-0.00379	0.00041	10.449	0.1856	-0.422	8.05E-20	0.178	17.843
Diâmetro das pontoações em corte radial	-0.00386	0.00041	11.496	0.2058	-0.393	3.54E-17	0.155	15.472
Altura dos raios	0.00296	0.0127	183.12	5.9637	0.0113	0.816	0.000	0.013
Largura dos raios	0.02830	0.00191	23.006	0.8981	0.5836	3.78E-40	0.341	34.055

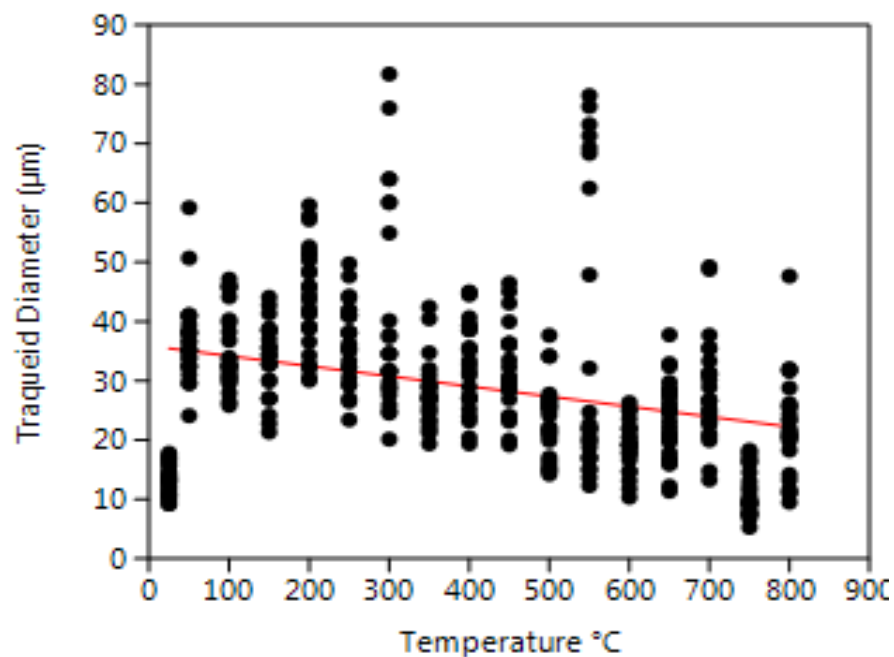
Fonte: Da autora

Figura 49 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro do lume de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



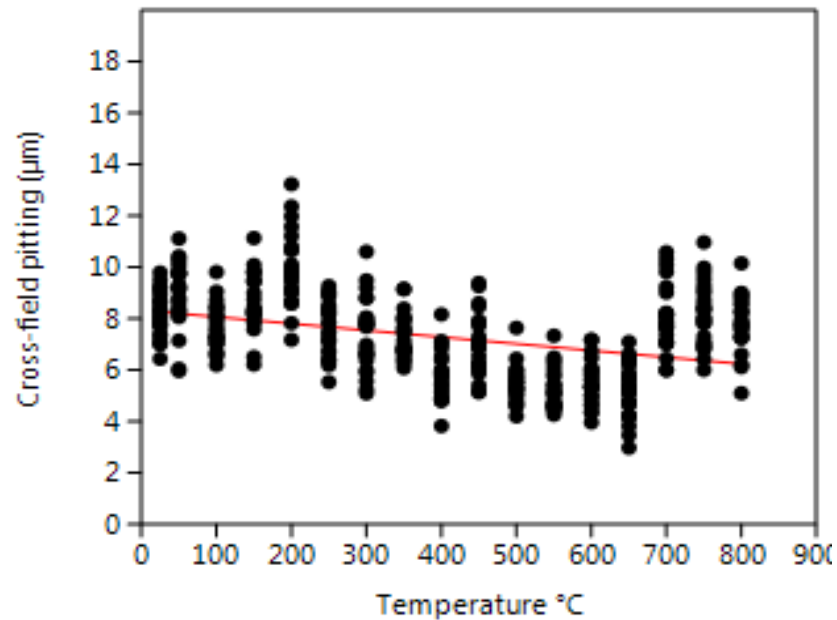
Fonte: Da autora

Figura 50 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das traqueídes de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



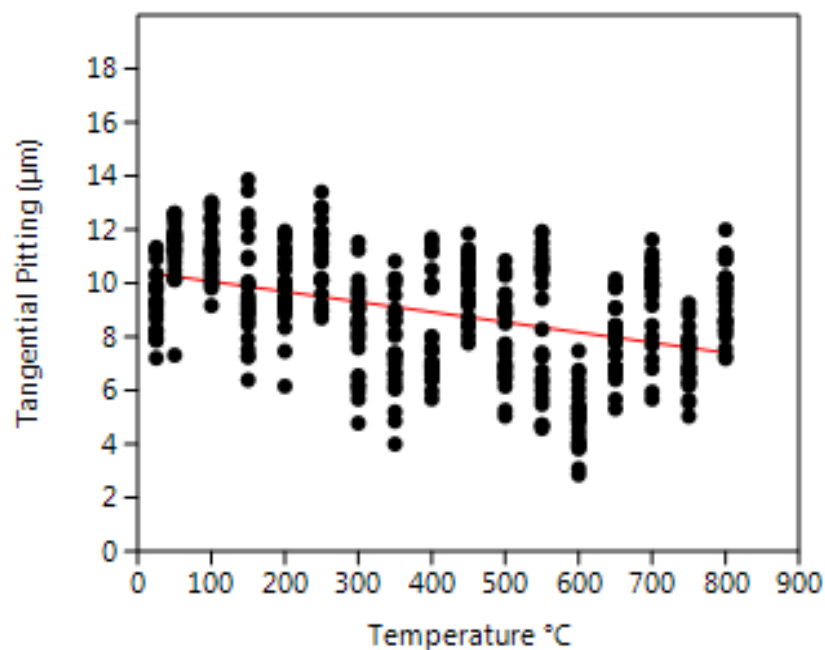
Fonte: Da autora

Figura 51 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações nos campos de cruzamento de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



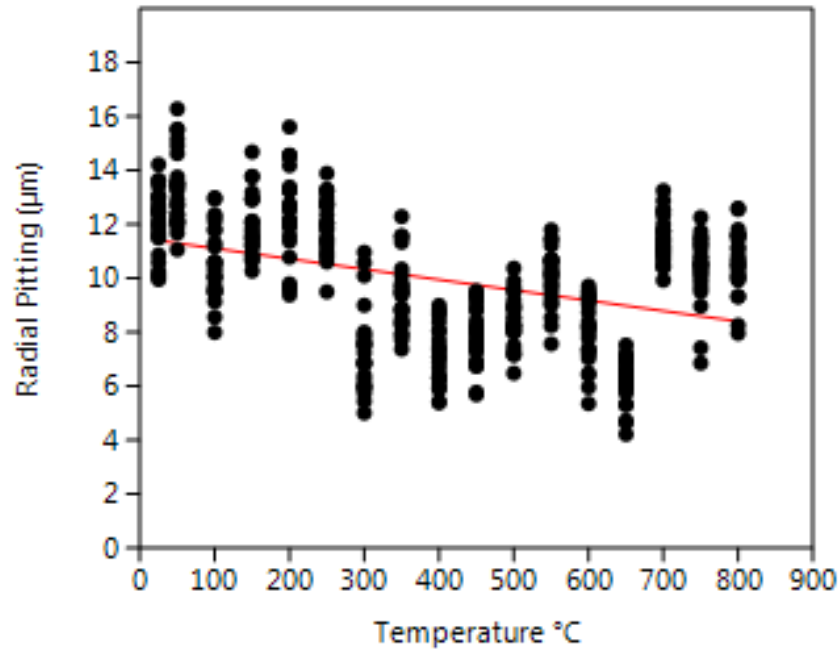
Fonte: Da autora

Figura 52 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no corte tangencial de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



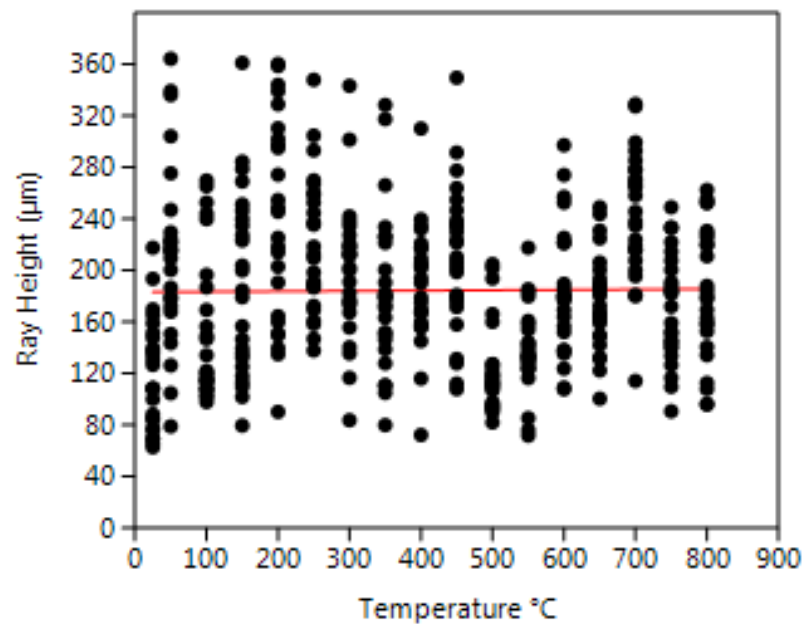
Fonte: Da autora

Figura 53 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições do diâmetro das pontoações no corte radial de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



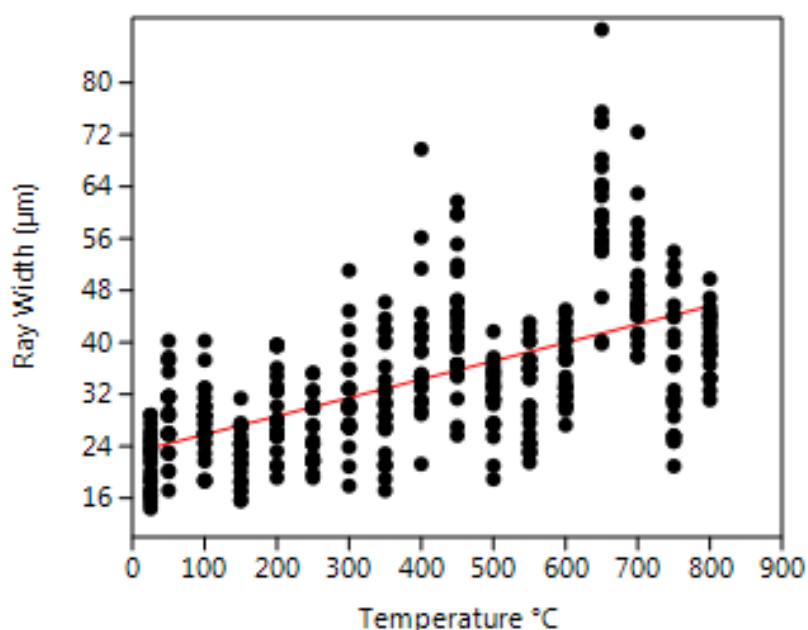
Fonte: Da autora

Figura 54 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da altura dos raios de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

Figura 55 – Representação gráfica da regressão linear bivariada dos dados de 25 medições da largura dos raios de *Araucaria columnaris* em diferentes temperaturas. A linha vermelha representa a tendência.



Fonte: Da autora

Os valores de  $r^2$ , coeficiente de correlação, são mais altos em *Araucaria angustifolia* (19,1%) e *Araucaria bidwilli* (39,9%) para o diâmetro do lume e em *Araucaria columnaris* para a largura dos raios (34,1% ). A Tabela 9 apresenta todos os valores de  $p$ ,  $r$  e  $r^2$  para as três espécies.

Tabela 9 – Valores de  $p$ ,  $r$  e  $r^2$  das características anatômicas medidas.

Característica Anatômica [ $\mu m$ ]	<i>Araucaria angustifolia</i>			<i>Araucaria bidwilli</i>			<i>Araucaria columnaris</i>		
	$p$	$r$	$r^2$	$p$	$r$	$r^2$	$p$	$r$	$r^2$
Diâmetro do lumen	1.62E-23	-0.437	0.191	1.08E-48	-0.6316	0.399	1.08E-17	-0.399	0.159
Diâmetro dos traqueídes em corte tangencial	3.50E-17	-0.374	0.140	4.72E-24	-0.4638	0.215	1.38E-11	-0.32	0.103
Diâmetro das pontoações em campo de cruzamento	8.78E-11	-0.292	0.085	1.20E-21	-0.4410	0.194	3.97E-15	-0.369	0.136
Diâmetro das pontoações em corte tangencial	1.63E-14	-0.342	0.117	1.83E-14	-0.3602	0.130	8.05E-20	-0.422	0.178
Diâmetro das pontoações em corte radial	7.04E-21	-0.412	0.170	1.41E-17	-0.3979	0.158	3.54E-17	-0.393	0.155
Altura dos raios	0.01796	-0.109	0.012	9.27E-12	-0.3228	0.104	0.816	0.0113	0.000
Largura dos raios	3.59E-14	0.3382	0.114	0.70331	0.0185	0.000	3.78E-40	0.5836	0.341

Fonte: Da autora

#### 4.6.2 Teste aplicado em *Wollemia nobilis*

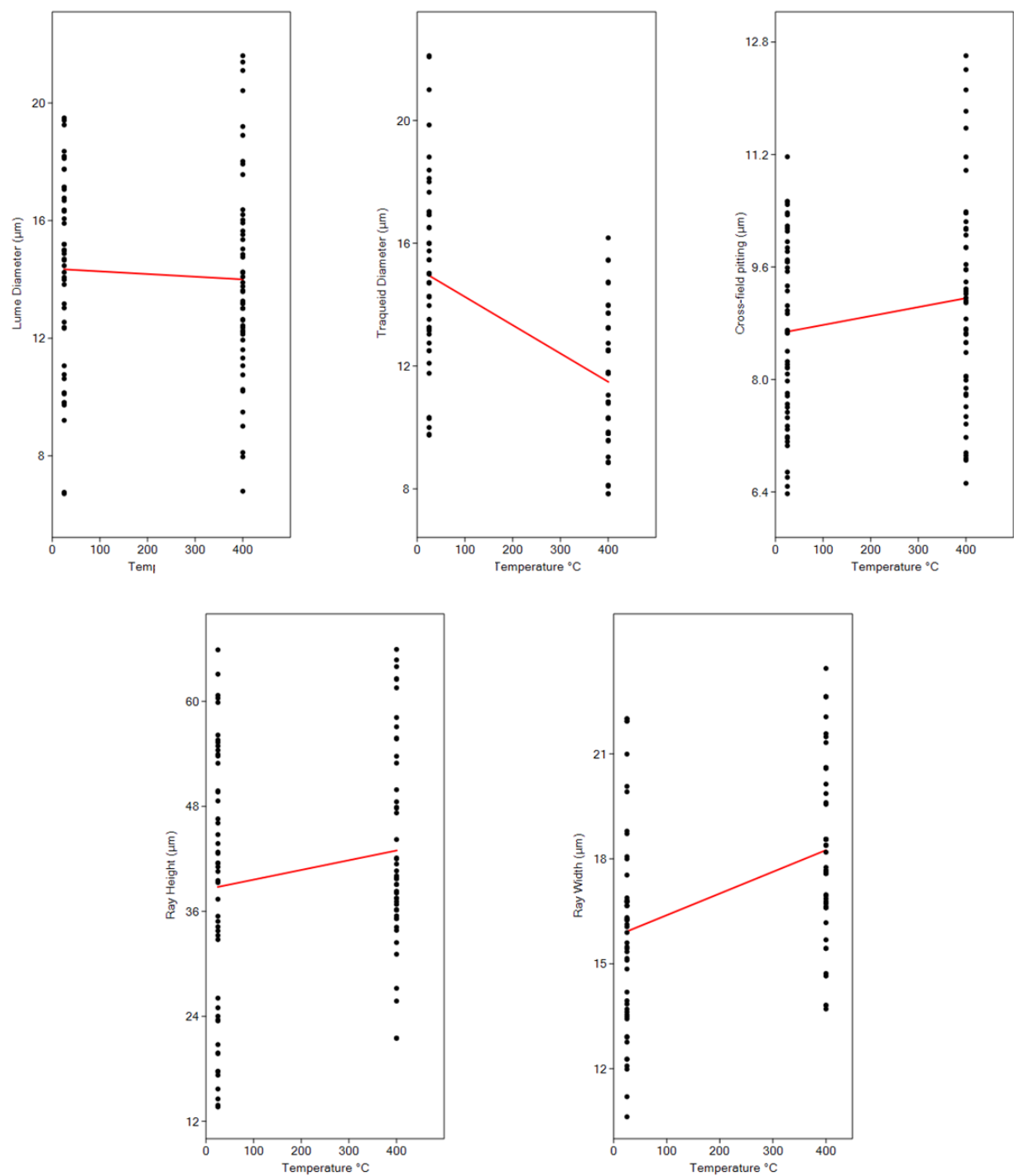
Para *Wollemia nobilis*, a regressão linear bivariada foi aplicada em cinco caracteres anatômicos, os resultados estão expressos no Quadro 1, referem-se a aplicação do software Past para a análise estatística, onde os 50 pontos, são as medidas realizadas na amostra *in natura* e na amostra carbonizada a 400°C.

Para o diâmetro do lume obteve-se o valor de  $p=0.61$ , demonstrando ser estatisticamente não significativo e o valor de  $\%r^2$  é de 0,26%, com uma correlação negativa. Para diâmetro dos traqueídes o valor de  $p=1,82E-09$ , neste caso apresentando uma diferença estatística significativa e  $\%r^2$  é de 30,98% e correlação com  $r$  negativa. O diâmetro das pontoações no campo de cruzamento apresenta  $p=0,09$ , estatisticamente não significativa, e  $\%r^2$  apenas 2,85%, com correlação com  $r$  positiva. A altura dos raios apresenta um  $p=0,12$ , não significativo estatisticamente e  $\%r^2=2,42\%$ , correlação com o  $r$  positiva, e a largura dos raios apresenta  $p=4,01E-05$ , com significância estatística, e valor de  $\%r^2$  de 15,88%, com correlação positiva.

Das cinco variáveis anatômicas avaliadas em *Wollemia nobilis*, duas apresentam entre as medições uma diferença significativa pela análise os valores de  $p$ , indicando que a temperatura tem uma significância estatística nestas variáveis medidas. A correlação com  $r$  é negativa no diâmetro o lume e das traqueídes, indicando que a medida que a temperatura aumenta as medições diminuem. Já para as pontoações e para a altura e largura dos raios a medida que a temperatura aumenta as medidas aumentas, sendo a correlação positiva.

Quadro 1 – Análise estatística linear regressiva bivariada, com %r<sup>2</sup> indicando a porcentagem dos dados do gráfico que são explicados pela temperatura (*Wollemia nobilis*).

Variable	Slope	Error	Intercept	Error	r	p	r <sup>2</sup>	%r <sup>2</sup>
Lume Diameter (µm)	-0.00091	0.001796	14.365	0.50892	-0.05105	0.61398	0.002606	0.26
Traqueid Diameter (µm)	-0.00922	0.001391	15.177	0.39409	-0.55663	1.82E-09	0.309837	30.98
Cross-field pitting (µm)	0.00127	0.000749	8.6492	0.21232	0.16874	0.093298	0.028473	2.85
Ray Height (µm)	0.01109	0.007111	38.515	2.0153	0.15562	0.12209	0.024218	2.42
Ray Width (µm)	0.006193	0.00144	15.772	0.40797	0.39853	4.01E-05	0.158826	15.88



Fonte: Da autora



#### 4.7 Discussão

Há uma abundância de estudos sobre a produção de carvão vegetal de forma experimental (e.g. KOLLMANN; SACHS 1967, MCGINNES et al., 1971, BEALL et al., 1974, CORREIA et al., 1974, SLOCUM et al., 1978, PRIOR; ALVIN, 1983, SCOTT, 1989, JONES et al., 1991; SCOTT; JONES 1991a, 1991b; PRIOR; GASSON, 1993; BUSTIN; GUO, 1999; GUO; BUSTIN, 1998; GERARDS et al., 2004, 2007; ERÇIN; YÜRUM, 2003; SCOTT; GLASSPOOL, 2005; KIM; HANNA, 2006; McPARLAND et al., 2007; BRAADBART; POOLE, 2008; KWON et al., 2009; NISGOSKI et al., 2014; GONÇALVES et al., 2012, 2014; MUÑIZ et al., 2012a, 2012b; AFONSO et al., 2015), mas poucos utilizam espécies da família Araucariaceae, (e.g. GERARD et al., 2007: *Araucaria araucana* (Molina), Koch, MUÑIZ et al., 2012b: *Araucaria angustifolia*).

Estes estudos demonstraram que durante a carbonização dos lenhos, ocorrem processos físicos e químicos que levam a alterações nas dimensões das estruturas celulares, mas geralmente a microestrutura anatômica do lenho permanece praticamente inalterada (como em Schweingruber, 2007). Conforme os dados anatômicos deste estudo isso também é válido para as espécies de Araucariaceae analisadas. Os dados anatômicos qualitativos não se alteraram significativamente durante a carbonização e estão de acordo com os dados de lenhos observados ou publicados anteriormente (e.g., Gregus 1955, Esteban et al., 2002).

Quando amostras de lenhos foram secas, antes da carbonização, suas pontoações nos campos de cruzamento são todas cobertas por uma fina parede de fechamento, possivelmente a parede celular primária, com apenas seu contorno visível. Isto significa que a espécime do lenho sem este muro de fechamento fino nas pontoações dos campos de cruzamento provavelmente sofreu um processo de carbonização quando fresco. Além disso, a presença desta fina parede faz com que seja necessário para estudar a corrosão através do campo de cruzamento, como visto no traqueíde na parede radial. Neste caso, só a altura e largura da abertura da pontoação pode ser medida (GERARDS et al., 2007).

O trabalho de Gerards et al., 2007, realizou o estudo biométrico de dimensões das pontoações nos campos de cruzamento, mostrando que as relações entre altura e largura da abertura da pontoação e das bordas, nos permite distinguir e caracterizar amostras entre quatro

tipos (taxodióide, piceóide, cupressóide e araucarióide) e mostram também que as perfurações do tipo piceóide carbonizadas não podem ser distintas das pontoações taxodióides frescas. Isso provavelmente resulta em identificação incorreta de lenho carbonizado fóssil.

Assim, parece ser possível distinguir espécies de Araucariaceae baseando-se em lenho carbonizado, na medida em que tais caracteres anatômicos qualitativos possam ser utilizados para tal fim (conforme Gregus 1955, Esteban et al., 2002). Há, entretanto, algumas mudanças anatômicas qualitativas e quantitativas que ocorrem durante a carbonização das espécies de Araucariaceae. Estudos anteriores demonstraram que ocorrem alterações anatômicas, dependendo da afiliação taxonômica, das características químicas e físicas do lenho, do tamanho do espécime carbonizado e da intensidade e dinâmica de combustão/aquecimento.

Conforme Schweingruber (1978), com uma perda de massa de 70-80%, as peças de carvão vegetal encolhem 7-13% de comprimento, 12-25% radialmente e tangencialmente, mas a afiliação taxonômica pode usualmente ser determinada após carbonização. O mesmo pode ser observado no presente estudo para as diferentes espécies de Araucariaceae, uma vez que mesmo após aquecimento a temperaturas elevadas, a estrutura anatômica não mudou significativamente, e as amostras carbonizadas ainda exibem detalhes anatômicos específicos do táxon.

A carbonização do lenho deve-se à degradação diferencial dos componentes do lenho e à sua recombinação numa estrutura enriquecida em carbono durante a degradação térmica, a partir de hemicelulose, seguida por celulose e finalmente por lignina (SLOCUM et al., 1978).

Durante a carbonização, as hemiceluloses degradam-se entre 170-300°C, celulose acima de 240°C e lignina acima de 280°C (BEALL; EICKNER, 1970; FENGEL; WEGENER, 1989; BYRNE; NAGLE, 1997). No entanto, a decomposição pirogênica não é evidente até a temperatura atingir cerca de 275°C (KOLLMANN; SACHS, 1967) e assim a carbonização do lenho normalmente não pode ser observada abaixo de 300°C (KWON et al., 2009).

O lenho, sujeito a carbonização, sofre várias alterações: (a) cor - escurecimento do lenho, que no final do processo torna-se negra; (B) propriedades físicas - perdas consideráveis de massa, contração, possíveis distorções anatômicas resultantes da carbonização e perda de muitas substâncias voláteis; (C) propriedades químicas - conversão contínua e gradual de três componentes químicos principais do lenho (celulose, hemicelulose e lignina) formando um

novo produto rico em carbono e quimicamente alterado (por exemplo, SHAFIZADEH; 1982; BRAADBART; POOLE 2008).

Perdas de massa significativas resultam do fato de os principais componentes químicos das paredes celulares serem pirolizados (WIEDEMANN et al., 1988, PARIS et al., 2005, TREUSCH et al., 2004). Os dados observados demonstram que a 300°C o processo de carbonização ainda é incompleto para os exemplares do gênero *Araucaria* analisados, uma vez que a perda de massa ainda aumentou com temperaturas de carbonização mais elevadas.

Em muitos casos, as características qualitativas do lenho original permanecem intactas, enquanto que os caracteres quantitativos tais como o tamanho da célula e a espessura da parede mudam. As características quantitativas são particularmente críticas quando se tenta distinguir entre espécies estreitamente relacionadas ou quando se extraem conclusões ecológicas (por exemplo, Prior e Gasson, 1993).

Cutter et al. (1980) examinaram a morfologia das traqueídes em *Pinus* carbonizado a 250-600°C e relataram que o desaparecimento de camadas discretas de parede celular dependia da taxa de aquecimento e da temperatura de carbonização e da espessura das paredes de células duplas diminuiu com o aumento da temperatura a 250-600°C. Nossos resultados concordam muito bem com Cutter et al. (1980), Kwon et al. (2009) e Kim e Hanna (2006), onde as paredes celulares do carvão vegetal perderam a distintiva camada, não houve distinção entre a lamela média e a parede celular e o carvão. Outras características morfológicas, como os raios uniseriados, as células dos raios mostram muito pouca separação entre si e os componentes celulares também são visíveis.

A cor negra e um brilho sedoso dependiam da velocidade de aquecimento e da temperatura de carbonização e, em geral, tais paredes celulares homogeneizadas juntamente com a cor negra e o brilho sedoso são frequentemente utilizados para a identificação de carvão vegetal fóssil (por exemplo, Scott 2000, 2010). Estas características desenvolveram-se entre 300°C e 350°C, o que também está de acordo com dados da literatura (SCOTT; 2000, 2010).

Embora este estudo tenha demonstrado que diferentes caracteres mudaram estatisticamente de forma significativa com o aumento das temperaturas de carbonização, tornou-se evidente que a maior parte da variabilidade observada para as espécies de *Araucariaaceae* provém da variabilidade dos caracteres dentro e entre os camadas de

crescimento (portanto, é controlada por fatores climáticos e ecológicos na localidade em crescimento).

Em muitos casos, apenas 35% da variabilidade global dos caracteres medidos pode ser explicada pela temperatura de carbonização. Para seis características anatômicas a tendência é negativa, somente a largura do raio está positivamente correlacionada em *Araucaria angustifolia* e *Araucaria columnaris*. Em altas temperaturas, os raios se rompem e quando essas características são medidas, os valores da medição são superiores em temperaturas mais altas do que em temperaturas mais baixas. Provavelmente esses táxons não estavam secos como o outro, então os raios estouraram devido ao rápido aquecimento da água presente no lenho.

Todos os dados sugerem que, apesar de algumas mudanças quantitativas ocorrerem durante a carbonização, parece possível usar carvão vegetal para diferenciar as espécies de Araucariaceae aqui analisadas. A questão que permanece é que se isso também pode ser feito para os táxon de lenho fóssil atribuível a *Agathoxylon*. Mas um estudo com apenas quatro táxons de Araucariaceae está longe de ser abrangente em relação a toda família, mas parece muito provável que isso seja possível, uma vez que os resultados obtidos para as espécies de Araucariaceae também estão de acordo com dados anteriores de um grande número de táxons sistematicamente não muito próximos.

Assim, parece pelo menos possível que essas observações possam ser generalizadas, embora se tenha sempre em mente que até agora a base de dados para Araucariaceae (e outras famílias paleontologicamente relevantes) ainda está longe de ser abrangente e possíveis exceções de observações anteriores nunca são impossíveis.

Offord et al. (1999) avaliou a reprodução sexual e o crescimento de *Wollemia nobilis* e concluiu que pausas na dispersão das sementes podem ocorrer pela ação de fogo ou outros eventos. Evidências de incêndios em caules antigos podem ser o maior determinante na estrutura da população de *Wollemia nobilis*. Um fogo de baixa intensidade pode aumentar o número de ramos capazes de produzir sementes e abrir áreas para a dispersão destas sementes, enquanto um fogo de alta intensidade ou séries de fogo baixo, podem diminuir ou destruir uma população.

A resposta desta espécie ao fogo e outros fatores, como solo e luz, devem ser estudados para determinar o por que desta distribuição ser tão restrita, investigando se o fogo

é um dos fatores em relação à população baixa de *Wollemia*.

#### 4.8 Conclusões

Com base nos dados apresentados e na interação dos resultados obtidos neste estudo, é possível concluir que:

- ✓ Apesar de algumas alterações menores, as características anatômicas qualitativas do lenho, comumente utilizadas para fins taxonômicos, permanecem inalteradas durante a carbonização de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria bidwillii*, *Araucaria columnaris* e *Wollemia nobilis*.
- ✓ Com temperaturas de carbonização crescentes, o lenho apresenta uma perda de massa crescente.
- ✓ Pequenas mudanças quantitativas das dimensões de diferentes caracteres anatômicos ocorrem, e essas mudanças dependem das temperaturas de carbonização.
- ✓ Todavia, as alterações observadas são menores do que a variabilidade intrínseca dos caracteres das amostras utilizadas.
- ✓ No material de Araucariaceae analisado, houve alteração nas características visíveis a olho nu dos fragmentos, com alteração da coloração para negra e desenvolvimento de brilho sedoso aos 300°C, (comparável às observações de estudos anteriores sobre diferentes táxon).
- ✓ Microscopicamente, também quando a temperatura de carbonização atingiu 300°C, houve a homogeneização das paredes celulares de todos os exemplares.
- ✓ Apesar das alterações observadas, elas não impedem a utilização de carvão vegetal produzido de espécies de Araucariaceae para fins taxonômicos.
- ✓ Entre as características anatômicas que mudam com significância estatística, a mais significativa após a carbonização é a largura dos raios, que explodem em altas temperaturas, provavelmente relacionadas aos teores de água do lenho.

- ✓ Na escala celular, o processo de carbonização leva a pequenas alterações anatômicas, apesar da significância estatística.
- ✓ A partir do modelo linear de regressão bivariada utilizado para a análise estatística, conclui-se que é possível fazer uma comparação taxonômica de amostras de carvão vegetal do registro fóssil com aquele produzido artificialmente à partir de lenhos da família Araucariaceae, sem incorrer em inferências incorretas.
- ✓ A carbonização a 400°C não altera as características anatômicas de *Wollemia nobilis* para fins de identificação taxonômica.
- ✓ Apesar de algumas medições apresentarem significância estatística, em nível celular elas são muito pequenas.
- ✓ É provável que o carvão vegetal do registro fóssil atribuível a *Agathoxylon* possa também ser usado para diferenciar distintos táxon, desde que eles exibam diferenças anatômicas suficientes.
- ✓ A ocorrência de alterações na estrutura interna dos tecidos vegetais em diferentes temperaturas de carbonização possibilita a utilização do carvão vegetal do registro fóssil como *proxy* para inferências (paleo)ambientais confiáveis.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, C. M. I.; GONÇALVES T. A. P. de; MUÑIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M. de; NISGOSKI, S. Mozambique's charcoals: anatomy of nine native species. **Bosque**, Chile, v. 36, n.1, p. 105-112, 2015.
- ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. O Processo de carbonização contínua da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte, p.143-156, 1982.
- ANDRADE, A.M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.
- ANDRADE, A.M.; CARVALHO, L.M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B., CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2006.
- ARMESTO, J.J.; VILLAGRÁN, C.; ARAVENA, J.C.; PÉREZ, C.; SMITH-RAMIREZ, C.; CORTÉS, M.; HEDIN, L. Conifers forests of the Chilean Coastal Range. In: ENRIGHT, N. J; HILL, R. S. (eds.). **Ecology of the Southern Conifers**. Melbourne: Melbourne University Press, 1995. p. 156-110.
- ASCOUGH, P. L.; BIRD, M. I.; SCOTT, A. C.; COLLINSON, M.E.; COHEN-OFRI, I.; SNAPE, C. E.; LE MANQUAIS, K. Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. **Journal of Archaeological Science**. v. 37, p. 1590-1599, 2010.
- BACKES, A. **Contribuição ao conhecimento da ecologia da Mata de Araucária**. 1973. 237 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.
- BAMFORD, M. K.; PHILIPPE, M. Jurassic-Early Cretaceous Gondwanan homoxylous woods: a nomenclatural revision of the genera with taxonomic notes. **Review of Paleobotany and Palynology**, v. 113, n. 4, p. 287-297, 2001.
- BEALL F. C.; EICKNER H. W. Thermal degradation of wood components: a review of the literature. **Research Paper. US Forest Products Laboratory**, Madison, n. 130, 1970.
- BEALL F. C.; BLANKENHORN P. R.; Moore G.R. Carbonized wood-physical properties

and use as an SEM preparation. **Wood Science**, Kyoto, v. 6, p. 212-9, 1974.

BEAUMONT, E. **Industrial Charcoal Making**. FAO Forestry Paper, vol. 63. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1985.

BEERLING, D. **The Emerald Planet: How Plants Changed Earth's History**. Oxford: Oxford University Press, 2007.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire story from the tropical mountain region of Morro de Itapeva, SE Brazil. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v. 129, n. 3-4, p. 407-422, 1997.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation and climate dynamics in southeastern Amazonia inferred from lagoa da Confusão in Tocantins State, northern Brazil. **Amazoniana**, v. 17, n. 1-2, p. 27-39, 2002.

BELCHER, C. M.; MCELWAIN, J. C. Limits for Combustion in Low O<sub>2</sub> Redefine Paleatmospheric Predictions for the Mesozoic. **Science**, v. 321, p. 1197-1200, 2008.

BELCHER, C. M.; YEARSLEY, J. M.; HADDEN, R. M.; MCELWAIN, J. C.; REIN, G. Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from palaeoatmospheric oxygen over the past 350 million years. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 107, p. 22448-22453, 2010.

BOND, W. J. The tortoise and the hare: ecology of angiosperm dominance and gymnosperm persistence. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 36, p. 227-249, 1989.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global "herbivore": the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 7, p. 387-394, 2005.

BOON, J. J.; PASTOROVA, I.; BOTTO, R. E.; ARISZ, P. W. Structural studies on cellulose pyrolysis and cellulose chars by PYMS, PYGCMS, FTIR, NMR and by wet chemical techniques. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 7, n. 1-6, p. 25-32, 1994.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, n. 5926, p. 481-484, 2009.

BRAADBART, F.; POOLE, I. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. **Journal of Archaeological Science**, v. 35, n. 9, p. 2434-2445, 2008.

BRADSTOCK, R. A. A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 2, p. 145-158, 2010.

BRITO, J.O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Piracicaba, SP, **Documentos Florestais**, Piracicaba, v. 9, p. 1-19, 1990.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Ed. Nobel, 1991.



- BUSTIN, R. M.; GUO, Y. Abrupt Changes (Jumps) In Reflectance Values and Chemical Compositions of Artificial Charcoals and Inertinite in Coals. **International Journal Of Coal Geology**, v. 38, n. 3, p. 237–260, 1999.
- BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Carbonization of wood for advanced materials applications. **Carbon**, v. 35, n. 2, p. 259-266, 1997.
- CABRERA, A. L. Territorios fitogeograficos de la Republica Argentina. **Boletin de la Sociedad Argentina de Botánica**, v. 4, n. 1, p. 21-56, 1951.
- CALIL, S. J.; ROCCO F. A.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais da madeira**. São Carlos: Editora Manole, 2003.
- CARPENTER, R. J.; POLE, M. S. Eocene plant fossil from the Lefroy and Cowan paleodrainages, Western – Australia. **Australian Systematic Botany**, v. 8, n. 6, p. 1107-1154, 1995.
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras**. Recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. EMBRAPA, 1994.
- CESTARO, L. A. Estudo microclimático do interior de uma mata de Araucária na Estação Ecológica de Aracuri, Esmeralda, RS. **Revista Árvore**, v.12, n.1, p. 41-57, 1988.
- CHALONER, W. G.; MCELWAIN, J. The fossil plant record and global climatic change. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 95, p. 73-82, 1997.
- CLARK, F. R. S.; RUSSELL, D. A. Fossil charcoal and the fossils from the Middle Jurrassic Scalby Formation of North palaeoatmosphere. **Nature** 290, 428. 1981.
- COPE, M. J.; CHALONER, W. G. Fossil charcoal and the palaeoatmosphere (Reply). **Nature**, v. 290, p. 428, 1981.
- CORREIA, M.; MAURY, R.; ARAI, F. Mesure Par Leur Pouvoir Re ´flecteur, Des Tempe ´ratures De Carbonisation Des Bois Fossilise ´S Dans Les Formations Volcaniques. **Bulletin Centre Recherches De Pau (Socie ´Te ´ Nationale Des Pe ´Troles D’aquitaine)**, v. 8, p. 527–536, 1974.
- CUTLER, D.F.; BOTHA, T.; STEVENSON, D.W. **Anatomia Vegetal: uma abordagem aplicada**. Porto Alegre: Artmed, 2011.
- CUTTER, B. E.; Cumbie B. G.; McGinnes E. A. SEM and shrinkage analyses of Southern Pine wood following pyrolysis. **Wood Science Technology**, v. 14, p. 115-130, 1980.
- DE LARA, D. M.; BRESCIANI L.; OSTERKAMP, I. C. et al. Avaliação de fragmentos de lenhos carbonizados de Araucariaceae por meio de análise por termogravimetria e infravermelho associado à análise multivariada. **Química Nova**, 2017.

- DE LAUBENFELS, D. Gymnosperms, no. 4. In: AUBREVILLE; LEROY J. S. (eds.). **Flore de la Nouvelle - Calédonie et Dépendances**. Paris. Muséum National 'Histoire Naturelle, 1972.
- DEL FUEYO, G. Una nueva Araucariaceae cretácica de Patagonia, Argentina. **Ameghiniana**, v. 28, n. 1-2, p. 149–161, 1991.
- DEL FUEYO, G. M.; ARCHANGELSKY, A. *Araucaria grandifolia* Feruglio from Lower Cretaceous of Patagonia, Argentina. **Cretaceous Research**, v. 23, n. 2, p. 265-277, 2002.
- DIMICHELE, W. A.; HOOK, R. W.; NELSON, W. J.; CHANEY, D. S. An unusual Middle Permian flora from the Blaine Formation (Pease River Group: Leonardian–Guadalupian Series) of King County, West Texas. **Journal of Paleontology**, v. 78, p. 765-782, 2004.
- DUTRA, T.; STRANZ, A. História das Araucariaceae: a Contribuição dos fósseis para o entendimento das adaptações modernas da família no Hemisfério Sul, com vistas a seu manejo e conservação. In RONCHI, L. H; COELHO, O. G. W. (Orgs.). **Tecnologia diagnóstico e planejamento ambiental**. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, 2003. p. 293-351.
- ENRIGHT, N. J.; OGDEN, J. The Southern Conifers - a synthesis. In: ENRIGHT, N. J; HILL, R. S. (eds.). **Ecology of the Southern Conifers**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1995. p. 271-287.
- ENRIGHT, N. J.; OGDEN, J.; RIGG, L. S. Dynamics of forests with Araucariaceae in the western Pacific. **Journal of Vegetation Science**, v. 10, n. 6, p. 793-804, 1999.
- ERÇİN, D.; YÜRÜM, Y. Carbonization of Fir (*Abies bornmulleriana*) wood in a Open Pyrolysis System at 50–300°C. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 67, p. 11-22, 2003.
- ESTEBAN, L.G.; CASASÚS, A.G.; PALACIOS, P.P. **Madeira de Coníferas**. Anatomía de géneros. Santiago: Fundación Conde del Valle de Salazar, 1996.
- ESTEBAN, L. G.; DE PALACIOS P. P.; DE GUINDEO, C. A.; GARCIA, E. L.; LÁZARO, D. I.; GONZÁLEZ, F. L.; RODRÍGUEZ, L. Y.; GARCÍA, F. F.; BOBADILLAMALDONADO, I.; CAMACHOATALAYA, A. Anatomía e Identificación de maderas de Coníferas a nivel de especie. **Mundi-Prensa**, Madrid, 2002.
- FALCON-LANG, H. J. Fire ecology of the Carboniferous tropical zone. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, n. 1, p. 339–355, 2000.
- FARJON, A. **World Checklist And Bibliography Of Conifers**. Kew: The Royal Botanic Gardens, 2001.
- FARJON, A. **A Monograph of Cupressaceae and Sciadopitys**. Kew: The Royal Botanic Gardens, 2005.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin: Walter De Gruyter, 1989.

FERRI, M. G. **Vegetação Brasileira**. Ed. Itatiaia –USP, 1980.

FLANNIGAN, M. D.; KRAWCHUK, M. A.; DE GROOT, W. J.; WOTTON, B. M.; GOWMAN, L. M. Implications of changing climate for global wildland fire. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, p. 483-507, 2009.

FORBES, M. S.; RAISON, R. J.; SKJEMSTAD, J. O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 370, n. 1, p. 190-296, 2006.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Compilado por Waldir Resende Penedo. Belo Horizonte, 1982.

GASTALDO, R. A.; DIMICHELE, W. A.; PFEFFERKORN, H. W. Out of the Icehouse into the Greenhouse: a Late Paleozoic Analog for modern global vegetational change. **Geological Society of America**, v. 6, n. 10, p. 2-7, 1996.

GERARDS, T.; DAMBLON, F.; WAUTHOZ, B.; GERRIENNE, P. Comparison of cross-field pitting in fresh, dried and charcoalified softwoods. **Iawa Journal**, v. 28, p. 49-60, 2007.

GERARDS, T.; GERRIENNE, P. Étude comparative au microscope électronique à balayage du xylème secondaire de gymnospermes et angiospermes actuelles avant et après carbonisation contrôlée. Résultats préliminaires. In: **Colloque OFP**, v. 29, p. 11-12, 2004.

GILMORE, S.; HILL, K. D. Relationships of the Wollemi Pine (*Wollemia nobilis*) and a molecular phylogeny of the Araucariaceae. **Telopea**, v. 7, n. 3, p.275-291, 1997.

GLASSPOOL, I. A major fire event recorded in the mesofossils and petrology of the Late Permian, Lower Whybrow coal seam, Sydney Basin, Australia. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, p. 373-396, 2000.

GLASSPOOL, I. J.; EDWARDS, D.; AXE, L. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. **Geology**, v.32, n. 5, p. 381-383. 2004.

GLASSPOOL, I. J.; SCOTT, A. C. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. **Nature Geosciences**, v.3, n. 9, p. 627-630, 2010.

GONÇALVES, T. A. P. **Anatomia do lenho e do carvão em espécies arbóreas do cerrado no estado de São Paulo, Brasil**. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Brazil, 2010.

GONÇALVES, T. A. P.; MARCATI, C. R.; SCHEEL-YBERT, R. The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum*, and *Pouteria torta* from the Brazilian Cerrado. **Iawa Journal**, v. 33, n. 1, p.73-90, 2012.

GONÇALVES, T. A. P.; BALLARIN, A. W.; NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B. A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil: anatomical characterization of *Corymbia* and *Eucalyptus*. **Maderas Ciencia Y Tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 323-336, 2014.

GONDRAN, M.; WOLTZ, P.; GAJARDO, R.; MARGUERIER, J. Xylologie des conifères endémiques des Andes méridionales au microscope électronique à balayage. II Araucariaceae–Cupressaceae. *Revue de cytologie et de biologie végétales*, v. 20, p. 3-13, 1997.

GREGUSS, P. **Identification of living gymnosperms on the basis of xylotomy**. Budapest: Akademiai Kiado, 1955.

GUERRA-SOMMER, M.; PIRES, E. F. Gimnospermas. In: CARVALHO, O. S. (Org.) **Paleontologia: paleovertebrados e paleobotânica**. v. 3. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 271-325.

GUO, Y.; BUSTIN, R. M. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. **International Journal of Coal Geology**, v. 37, p. 29-53, 1998.

GUTSELL, J.; JOHNSON, E. Wildfire and Tree Population Processes. In: JONHSON, E.; MIANISHI, K. (Orgs.). **Plant Disturbance Ecology**. Amsterdam: Elsevier, 2007, p. 441-477.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, p. 1-9, 2011.

HARRIS, T. M. **The Yorkshire Jurassic Flora V. Coniferales**. London: British Museum, 1979.

HEADY, R. D.; BANKS, J. G., EVANS, P. D. Wood anatomy of Wollemi pine (*Wollemia nobilis*, Araucariaceae). **IAWA Journal**, v. 23, p. 339-357, 2002.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre determinação das características físicas da madeira**. 1973. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1973.

HERBST, R. Revisión de la flora liásica de Pedra Pintada, Prov. Neuquén, Argentina. **Revista Museo de La Plata**, v. 5, n. 30, p. 27-53, 1966.

HOADLEY, B. **Identifying Wood: Accurate Results with Simple Tools**. Connecticut: Taunton Press, 1990.

HUECK, K. Distribuição e habitat natural do Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). **Boletim Geográfico**, v. 19, n. 165, p. 709-723, 1961.

HUECK, K. Verbreitung und Standortansprüche der brasilianischen Araukarie (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.). **Forstwissenschaftliches Centralblatt**, v. 71, n. 9-10, p. 272-289, 1952.

IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for softwood identification. **IAWA Journal**, v. 25, p. 1-70, 2004.

JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; UHL, D.; SALVI, J.; KAUFFMANN, M.; OSTERKAMP, I. C.; GONÇALVES, C. V. A ocorrência de Incêndios vegetacionais durante o paleozóico superior da Bacia do Paraná. In: CARVALHO, I. S.; CASSAB, R. C. T.; SCHWANKE, C.; CARVALHO, M. A.; FERNANDES, A. C. S.; RODRIGUES, M. A. C.; CARVALHO, M. S. S.; ARAÍ, M.; OLIVEIRA, A. E. Q. O. (Orgs.). **Paleontologia: Cenários de Vida**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007. p. 14-25.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; MOSBRUGGER, V. Palaeobotanical evidence of wildfires in the Late Palaeozoic of South America (Gondwana) – Early Permian, Rio bonito Formation, Parana Basin, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Journal South American Earth Science**, v. 26, n. 4, p. 435-444. 2008.

JASPER, A.; UHL, D.; GUERRA-SOMMER, M.; HAMAD, A. M. B. A.; MACHADO, N. T. G. Charcoal remains from a tonstein layer in the Faxinal Coalfield, Lower Permian, southern Paraná Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 2, p. 471-48, 2011a.

JASPER, A.; GUERRA-SOMMER, M.; UHL, D.; MACHADO, N. T. G.; SECCHI, M. I.; MANFROI, J. Análise de carvão vegetal como evidência direta de paleoincêndios vegetacionais: registros no Permiano da Bacia do Paraná. In: CARVALHO, I. S.; SRIVASTAVA, N. K.; STROHSCHOEN, J. R. O.; LANA, C. C. (Orgs.). **Paleontologia: Cenários de Vida**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011b. p. 23-32.

JONES, T. P.; SCOTT, A. C.; COPE, M. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. **Bulletin de la Société Géologique de France**, v. 162, n. 2, p. 193-200, 1991.

JONES, T. P.; CHALONER, W. G. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 97, n. 1-2, p. 39-50, 1991.

JONES, W. G.; HILL, K. D.; ALLEN, J. M. *Wollemia nobilis*, a new living Australian genus and species in the Araucariaceae. **Telopea**, v. 6, p. 173-176, 1995.

JUDD, W.S.; CAMPBELL, C.S.; KELLOGG, E.A.; STEVENS, P.F.; DONOGHUE, M.J. **Sistemática Vegetal: um enfoque filogenético**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

KAUFFMANN, M. **Fragmentos de charcoal (carvão vegetal fóssil) como indicativo da ocorrência de incêndios vegetacionais durante o Quaternário do Planalto das Araucárias, Rio Grande do Sul, Brasil**. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2008.

KERSHAW, P.; WAGSTAFF, B. The Southern Conifer family Araucariaceae: History, Status and Value for paleoenvironmental reconstruction. **Annual Review of Ecological Systematics**, v. 32, n. 1, p. 397-414, 2001.

KERSHAW, P.; McGLONE, M. S. The Quaternary History of the southern conifers. In: ENRIGHT, N. J.; HILL, R. S. (Orgs.). **Ecology of southern conifers**. Melbourne: Melbourne University press, 1995. p. 30-63.

- KIM, N. H.; HANNA, R. B. Morphological Characteristics of *Quercus variabilis* Charcoal Prepared at Different Temperatures. **Wood Science And Technology**, v. 40, n. 5, p. 392-401, 2006.
- KLEIN, R. M. O aspecto dinâmico do pinheiro brasileiro. **Sellowia**, v. 12, p. 17-44, 1960.
- KOLLMANN, F. F. P.; SACHS, I. B. The effects of elevated temperature on certain wood cells. **Wood Science and Technology**, v. 1, n. 1, p. 14-25, 1967.
- KUČERA, L. J. Cutting wood specimens for observations in the scanning electron microscope. **Journal of Microscopy**, n. 124, p. 319-325, 1981.
- KUNZMANN, L. Neue Untersuchungen zu Araucaria Jussieu aus der europäischen Kreide. **Palaeontographica**, v. 276, p. 97-131, 2007a.
- KUNZMANN, L. Araucariaceae (Pinopsida): Aspects in palaeobiogeography and palaeobiodiversity in the Mesozoic. **Zoologischer Anzeiger**, n. 246, p. 257-277, 2007b.
- KWON, S.; KIM, N.; CHA, D. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. **Wood Science and Technology**, v. 43, n. 5, p. 487-498, 2009.
- LEITE, P. F. Contribuição ao conhecimento fitoecológico do sul do Brasil. **Ciência e Ambiente**, v. 24, p. 51-73, 2002.
- LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. Vegetação. In: **Geografia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990.
- LEPAGE, E. N. **Manual de Preservação da Madeira**. São Paulo: IPT, 1986.
- LORSCHUITTER, M. L. Evidences of sea oscillations of the Late Quaternary in Rio Grande do Sul, Brazil, provided by palynological studies. **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, v. 1, p. 53-60, 1983.
- MACPHAIL, M.; HILL, K., PARTRIDGE, A.; TRUSWELL, E.; FOSTER, C. Wollemi Pine - Old Pollen Records for a Newly Discovered Genus of Gymnosperm. **Geology Today**, v. 11, n. 2, 48-50, 1995.
- MCPARLAND, L.; COLLINSON, M. E.; SCOTT A. C.; STEART D. Ferns and fires: experimental charring of ferns compared to wood and implications for paleobiology, coal petrology and isotope geochemistry. **PALAIOS** 22, 528-538, 2007.
- MAHESH, S.; MURTHY, S.; CHAKRABORTY, B.; ROY, M. D. Fossil charcoal as palaeofire indicators: taphonomy and morphology of charcoal remains in Sub-Surface Gondwana Sediments of South Karanpura Coalfield. **Journal of the Geological Society of India**, v. 85, p. 1-10, 2015.
- MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das Gimnospermas**. Santa Maria: Editora UFSM, 1996.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul. Enfoque Histórico e Sistemas de Classificação**. Porto Alegre: EST Edições, 2002.

MARGUERIE, D.; HUNOT, J.Y. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. **Journal of Archaeological Science**, v. 34, n. 9, p. 1417-1433, 2007.

MASIELLO, C. A.; DRUFFEL, E. R. M. Black carbon in deep sea sediments. **Science**, v. 280, p. 1911-1913, 1998.

MATTOS, J. R. **O pinheiro brasileiro**. Lages: EDUFSC SC, 1994.

McGINNES, J. R. E. A.; KANDEEL, S. A.; SZOPA, P. S. Some structural changes observed in the transformation of wood into charcoal. **Wood and Fiber**, v. 3, n. 2, p. 77-83, 1971.

McPARLAND, L. C.; COLLINSON, M. E.; SCOTT, A. C.; STEART, D. C.; GRASSINEAU, N. V.; GIBBONS, S. J. Ferns and fires: experimental charring of ferns compared to wood and implications for paleobiology, paleoecology, coal petrology, and isotope geochemistry. **Palaios**, v. 22, n. 5, p. 528-538, 2007.

MEIRA, A. M. **Diagnóstico sócio-ambiental e tecnológico da produção de carvão vegetal no município de Pedra Bela, Estado de São Paulo**. 2002. 99 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MEYEN, S. M. **Fundamentals of Paleobotany**. London: Chapman and Hall, 1987.

MILLER, C. The origin of modern conifer families. In: BECK, C. B. (Orgs). **Origin and Evolution of Gymnosperms**. Columbia: Columbia University Press, 1988. p. 429-448.

MUJICA, R. Los bosques de Araucária araucana em Chile y Argentina. Parte I: Estudios sobre tratamientos silvícolas em Chile. In: **Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Alemanha**: Eschborn, 2003. p. 7-77.

MUÑIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; FRANÇA, R.; SCHARDOZIN, F. Anatomia comparativa da madeira e carvão de *Cedrelinga catenaeformis* Ducke e *Enterolobium schomburgkii* Benth. Para fins de identificação. **Scientia Forestalis**, v. 40, p. 192-297, 2012a.

MUÑIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; SHARDOSIN, F. Z.; FRANÇA, R. F. Anatomia do carvão de espécies florestais. **Cerne**. v. 18, p. 471-477, 2012b.

NIMER, E. **Clima**. In: Geografia do Brasil. IBGE, Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro. P. 420, 1990.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G. I. B.; BATISTA, F. R. R.; MÖLLEKEN, R. E. Influence of carbonization temperature on the anatomical characteristics of *Ocotea porosa* (Nees et Mart. Ex Nees) L. Barroso. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 301-309, 2014.

OFFORD, C. A.; C. L. PORTER, P. F.; MEAGHER, G. E. Sexual reproduction and early plant growth of the Wollemi pine (*Wollemia nobilis*), a rare and threatened Australian conifer. **Annals of Botany**, v. 84, p. 1-9, 1999.

OGDEN, J.; STEWART, G. H. Community dynamics of the New Zealand conifers. In: ENRIGHT, R. S.; HILL, R. S. (Orgs.). **Ecology of the Southern Conifers**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1995. p. 81-119.

OSTERKAMP, I. C.; LARA, D. M.; GONÇALVES, T. A. P.; KAUFFMANN, M.; PÉRICO, E.; STÜLP, S.; MACHADO, N. T. G.; UHL, D.; JASPER, A. Changes of wood anatomy of selected *Araucaria*-species during artificial charring – implications for palaeontology. **Acta Botanica Brasilica**. (*submitted*)

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1980.

PARIS, O.; ZOLLFRANK, C.; ZICKLER, G. A. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers – a microstructural study of softwood pyrolysis. **Carbon**, v. 43, p. 53-66, 2005.

PARODI, L. R. Las regiones fitogeográficas argentinas. **Ciência e Ambiente**, v. 24, p. 25-34, 2002.

PERALTA, M. Geomorfología, clima y suelos del tipo florestal *Araucaria* en Lonquimay. **Boletín Técnico de la Facultad de Ciencias Forestales**, Universidad de Chile, p. 57, 1980.

PHILLIPS, E. W. J. **Identification of softwoods by their microscopic structure**. 1948.

PRESTON, C. M.; SCHMIDT, M. W. I. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions. **Biogeosciences**, v. 3, p. 397-420, 2006.

PRIOR, J.; ALVIN, K. L. Structural changes on charring woods of *Dichrostachys* and *Salix* from southern Africa. **Iawa Bulletin**, v. 4, p. 197-206, 1983.

PRIOR, J.; GASSON, P. Anatomical changes on charring six African hardwoods. **Iawa Journal**, v. 14, n. 1, p. 77-86, 1993.

PYNE, S. J.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to Wildland Fire**. J. Wiley and Sons, New York. 1996.

QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. D. Transições floresta-campo no Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, v. 24, p. 109-118, 2002.

RAGONESE, A. E.; CASTIGLIONE, J. A. Los Pinares de *Araucaria angustifolia* en la Republica Argentina. **Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica**, v. 2, p. 1-230, 1946.

RAMBO, B. **A Fisionomia do Rio Grande do Sul**. Ensaio de monografia regional. 2a ed. Selbach, Porto Alegre (Jesuítas no Sul do Brasil, 6), ed. UNISINOS, São Leopoldo, 1956.



RAMBO, B. **O elemento andino no pinhal riograndense**. Anais Botânicos do “Herbário Barbosa Rodrigues”, 1951.

RASBAND, W. S., 1997-2017. J, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <<https://imagej.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 20 de mar. de 2015.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 2014.

RECHENE, C.; BAVA, J. **Los bosques de Araucaria araucana em Chile y Argentina**. Parte II: Estudios silvícolas y propuestas para su conservación y uso em Argentina. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GZT), TWF-40s, Eschborn. Alemanha. p. 89-158, 2003.

RENNER, S. Gymnosperms. In: HEDGES, S. B.; KUMAR, S. (Orgs.). **The timetree of life**. Oxford: Oxford University Press, 2009. p. 157-160.

RIZZINI, C. T. Tratado de fitogeografia do Brasil: **aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos**. Âmbito Cultural Edições Ltda. 1997.

ROGERS, L. J. Reforestation of Paraná Pine. **Unasylva**, v. 8, p. 15-18, 1954

SALISBURY, R. A. XIV. The Characters of several Genera in the Natural Order of Coniferae: with Remarks on their Stigmata, and Cotyledons. **Transactions of the Linnean Society of London**, v. 8, n. 1, p. 308-317, 1807.

SANDER, P. M. Taphonomy of the Lower Permian Geraldine bonebed in Archer County, Texas. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 61, p. 221-236, 1987.

SANDER, P. M.; GEE, C. T. Fossil charcoal techniques and applications. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 63, p. 269-279, 1990.

SCHMITHÜSSEN, J. Problems of vegetation history in Chile and New Zealand. **Vegetatio**, v. 13, n. 4189-206, 1966.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Mikroskopische Holzanatomie**. 3. Aufl. Eidg. Forschungsanstalt Für Wald Schnee Und Landschaft, 1978.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Wood Structure and Environment**. Germany: Springer, 2007.

SCOTT, A. C. Observations on the Nature and Origin of Fusain. **International Journal Coal Geology**, v. 12, p. 443-475, 1989.

SCOTT, A. C. Anatomical preservation of fossil plants. In: BRIGGS, D.E.G.; CROWTHER, P. (Orgs.). **Palaeobiology, a Synthesis**. New Jersey: Blackwell Scientific Publications, 1990. p. 263-266.

SCOTT, A. C. The Pre-Quaternary History of Fire. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, p. 281-329, 2000.

SCOTT, A. C. Charcoal in sediments. In: MIDDLETON, G.V. (Orgs). **Encyclopaedia of Sediments and Sedimentary Rocks**. Berlin: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 121-123

SCOTT, A. C.; JONES, T. P. Fossil charcoal: a plant-fossil record preserved by fire. **Geology Today**, v. 7, p. 214–216, 1991a.

SCOTT, A. C.; JONES, T. P. Microscopical observations of recent and fossil charcoal. **Microscopy and Analysis**, v. 24, p. 13-15, 1991b.

SCOTT, A. C.; JONES, T. P. The nature and influence of fires in Carboniferous ecosystems. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 106, p. 92-112, 1994.

SCOTT, A.C.; STEA, R., Fires sweep across the mid-Cretaceous landscape of Nova Scotia. **Geoscientist**, v. 12, p. 4-6, 2002.

SETOGUCHI, H.; OSAWA, T. A.; OINAUD, J. C.; JAFFRÉ, T.; VEILLON, J. M. Phylogenetic relationships within Araucariaceae based on rbcL gene sequences. **American Journal of Botany**, v. 85, p. 1507-1516, 1998.

SEWARD, A. C.; FORD, S. O. The Araucariaceae, Recent and Extinct. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 198, p. 305-411, 1906.

SHAFIZADEH, F. Introduction to pyrolysis of biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v 3, p. 283-305, 1982.

SHEN, S. Z.; CROWLEY, J. L.; WANG, Y.; BOWRING, S. A.; ERWIN, D. H.; SADLER, P. M.; CAO, C. Q.; ROTHMAN, D. H.; HENDERSON, C. M.; RAMEZANI, J.; ZHANG, H.; SHEN, Y.; WANG, X. D.; WANG, W.; MU, L.; LI, W. Z.; TANG, Y. G.; LIU, X. L.; LIU, L. J.; ZENG, Y.; JIANG, Y. F.; JIN, Y. G. Calibrating the end-Permian mass extinction. **Science**, v. 334, p. 1367-1372, 2011.

SHMULSKY, R.; JONES, D. **Forest Products and Wood Science: An Introduction**. 6 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse. Syracuse University Press, p. 131, 1971.

SJOSTROM, S. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. London: Academic press, 1981.

SLATER, B. J.; MCLOUGHLIN, S.; HILTON, J. A high-latitude Gondwanan lagerstätte: the Permian permineralized peat biota of the Prince Charles Mountains, Antarctica. **Gondwana Research**, v. 27, p. 1446-1473, 2015.

SLOCUM, D. H.; MCGINNES, E. A.; BEALL, F. C. Charcoal yield, shrinkage, and density changes during carbonization of oak and hickory woods. **Wood Science**, v. 11, p. 42-47, 1978.

SNELLING, A.; ANDREW, A. *Wollemia nobilis*: A Living Fossil and Evolutionary Enigma. *Acts & Facts*. v. 35 p. 4, 2006.

SOROKHTIN, O. G.; CHILINGAR, G. V.; KHILYUR, L. F. **Global warming and global cooling: evolution of climate on Earth**. Amsterdam: Elsevier, 2007.

STEFANOVIC, S.; JAGER, M.; DEUTSCH, J.; BROUTIN, J.; MASSELOT, M.; Phylogenetic relationships of conifers inferred from partial 28S rRNA gene sequences. **Am. J. Bot.** v. 85, p. 688-697, 1998.

STEWART, W. N. **Paleobotany and the evolution of plants**. Cambridge University Press: Cambridge, 1987.

STRAHLER, A. N.; STRAHLER, A. H. **Elements of Physical Geography**. John Wiley and Sons, New York, 1989.

TAYLOR, G. **La madera**. Barcelona: Editora Blume, 1978.

TAYLOR, T.; TAYLOR, E. **The Biology and Evolution of Fossil Plants**. Prentice Hall, N. Jersey, 1993.

TEIXEIRA, M. B.; NETO, A. B. C.; PASTORE, U.; FILHO, A. L. R. R. Vegetação. In: **Levantamento de Recursos Naturais**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. p. 541-632.

TEWARI, R.; CHATTERJEE, S.; AGNIHOTRI, D.; PANDITA, S. K. Glossopteris flora in the Permian Weller Formation of Allan Hills, South Victoria Land, Antarctica: implications for paleogeography, paleoclimatology, and biostratigraphic correlation. **Gondwana Research**, v. 28, p. 905-932, 2015.

THIBAU, C. E. **Produção sustentada em florestas**. Belo Horizonte: UFVJM, 2000.

TRABAUD, L. **Les feux de forêts: mécanismes, comportement et environnement**. 2.ed. - Aubervilliers : France-Selection, 1992.

TREUSCH, O.; HOFENAUER, A.; TRÖGER, F.; FROMM, J.; WEGENER, G. Basic properties of specific wood-based materials carbonised in a nitrogen atmosphere. **Wood Science and Technology**, v. 38, p. 323-333, 2004.

UHL, D.; HAMAD, A. A.; KERP, H.; BANDEL, K. Evidence for palaeo-wildfire in the Late Permian palaeotropics – charcoalified wood from the Um Irna Formation of Jordan. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 144, p. 221–230, 2007.

UHL, D.; KERP, H. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe – The Zechstein (Upper Permian) of NW – Hesse (Germany). **Palaeo**, v. 199, p. 1-15, 2003.

UHL, D.; LAUSBERG, S.; NOLL, R.; STAPF, K. R. G. Wildfires in the Late Palaeozoic of Central Europe—an overview of the Rotliegend (Upper Carboniferous–Lower Permian) of the Saar-Nahe Basin (SW-Germany). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 207, p. 23-35, 2004.

UHL, D.; JASPER, A.; HAMAD, A. M. B. A.; MONTENARI, M. Permian and triassic wildfires and atmospheric oxygen levels. In: 1st WSEAS International Conference on ENVIRONMENTAL and GEOLOGICAL SCIENCE and ENGINEERING (EG'08) Malta, September, p. 11-13, 2008.

VEBLEN, T.T.; BURNS, B.R.; KITZBERGER, T.; LARA, A.; VILLALBA, R. The ecology of the conifers of South America. In: ENRIGHT, N.; HILL, R. (Orgs.). **Ecology of the Southern Conifers**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1995. p. 120-155.

VEILLON, J. M. Architecture des especes neo-caledoniennes du genre Araucaria. **Candollea**, v. 35, p. 609-640, 1980.

VELOSO, H. P.; FILHO, A. L. R. R.; LIMA, J. C. A. Classificaçãp da Vegetação Brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro, **IBGE**, v. 123, 1991

WANG, Z.; CHEN, A. Traces of arborescent lycopside and dieback of the Forest vegetation in relation to terminal Permian mass extinction in North China. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 117, p. 217-243, 2001.

WATSON, A.; LOVELOCK, J. E.; MARGULIS, L. Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. **BioSystems**, v. 10, p. 293-298, 1978.

WIDEMANN, H. G.; RIESEN, R.; BOLLER, A. B. From wood to coal: a compositional thermogravimetric analysis. In: EARNEST, C. M. (Orgs.). **From Wood to Coal: a Compositional Thermogravimetric Analysis**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988. p. 227-244.

WILLIS, K. J.; MACELWAIN, J. C. **The Evolutions of plants**. New York: Oxford University Press Inc., 2002.

ZEDLER, P. Fire Effects on Grasslands. In: JONHSON, E.; MIANISHI, K (Orgs.). **Plant Disturbance Ecology**. Amsterdam: Editora Elsevier, p. 698 , 2007.